

VINCENT CANTIN

**COMPORTEMENTS OCULAIRES ET CHARGE
COGNITIVE DES CONDUCTEURS JEUNES ET
ÂGÉS**

Études réalisées en conduite simulée

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en Kinésiologie
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

MÉDECINE SOCIALE ET PRÉVENTIVE
MÉDECINE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2009

Résumé

Le vieillissement est une expérience irréversible vécue par tous les êtres vivants. Au Canada, des changements démographiques importants sont à prévoir au cours des prochaines années avec l'arrivée des premiers baby-boomers à l'âge de 65 ans et l'espérance de vie accrue. Pour l'être humain, le vieillissement amène une dégénérescence des fonctions sensorimotrices et cognitives. Même les individus en bonne santé subissent un déclin de leur capacité. Toutefois, chaque individu vieillit et subit le vieillissement d'une façon différente et à un rythme différent. Avec les changements démographiques importants, le questionnement à propos de la capacité des personnes âgées à conduire est très actuel.

L'objectif principal de cette thèse est de documenter la performance des conducteurs âgés en bonne santé et asymptomatiques dans différents contextes de conduite simulée. L'originalité repose sur le fait que toutes les études ont été réalisées dans un environnement dynamique et bien contrôlé.

Dans un premier temps, une méthode efficace et non intrusive permettant de quantifier la charge cognitive imposée par un contexte de conduite simulée a été développée. Cette méthode nous a permis de mener deux études qui ont montré que la conduite d'un simulateur de conduite est loin d'être une tâche automatique et que la charge cognitive augmentait significativement lors des contextes complexes de conduite comme la négociation d'une intersection ou les manœuvres de dépassement. Dans l'ensemble, les personnes âgées ont montré une charge cognitive plus importante que les conducteurs plus jeunes dans tous les contextes de conduite, mais les différences étaient exacerbées pour les manœuvres de dépassement. La performance de conduite a également été modifiée par l'augmentation de la charge cognitive. Une vitesse moins importante et une variabilité plus grande du déplacement latéral ont notamment été observées. Le résultat le plus intéressant concerne toutefois les comportements de freinage des participants qui ont montré un nombre d'événements de freinage (pic de décélération excédant 0.1 g) plus élevé pour les intersections imposant une charge cognitive élevée. Ces résultats montrent une relation directe entre la performance et le niveau de charge cognitive imposée par la situation de conduite. Les conducteurs âgés ont montré la même dégradation de la performance que les jeunes conducteurs, mais à un niveau plus important.

Par la suite, les comportements oculaires et les stratégies visuelles des conducteurs ont été étudiés. Notre objectif était de documenter les stratégies de recherche visuelle des conducteurs incluant les conducteurs âgés dans des contextes dynamiques de conduite et d'évaluer si les déficits oculaires et de recherche d'informations habituellement rapportés chez les personnes âgées étaient exacerbés dans des situations où la charge cognitive était plus importante. Cependant l'analyse des comportements oculaires n'a pas montré de différences importantes entre nos deux groupes de sujet même si une diminution du champ visuel des conducteurs âgés a été observée et que certaines tendances ont été relevées notamment au niveau des patrons de balayage visuel de la scène. L'absence de différences probantes peut avoir été causée par la population de personnes âgées évaluées qui étaient relativement jeunes et en bonne santé. Malgré tout, nos résultats ne supportent pas totalement l'opinion de certains auteurs (Ball, Owsley et al. 1993; Underwood, Phelps et al. 2005) voulant que les personnes âgées relativement jeunes et en bonne santé ne constituent pas un risque augmenté pour la sécurité routière puisque plusieurs altérations de la performance de conduite ont été notées.

Avant-propos

Je suis le principal auteur des articles présentés aux chapitres 4 et 5. J'ai effectué le design des expérimentations et supervisé la collecte des données qui a été réalisée par le professionnel de recherche Mathieu Tremblay et les étudiants Guillaume Desroches et Martin Lavallière. J'ai effectué l'analyse complète des données et la rédaction des manuscrits.

Je suis deuxième auteur de l'article présenté au chapitre 2. J'ai également réalisé le design de l'expérimentation et la collecte des données. L'étudiant Guillaume Desroches m'a assisté pour la collecte des données. J'ai activement contribué à l'analyse des données, à la rédaction et à la révision de l'article.

Je suis troisième auteur de l'article présenté au chapitre 3. J'ai mis en place l'expérimentation et supervisé la collecte des données qui a été effectuée par le professionnel de recherche Mathieu Tremblay et les étudiants Guillaume Desroches et Martin Lavallière. J'ai contribué à la rédaction et à la révision de l'article.

J'ai également été responsable, pour chacune des expérimentations, du développement et de la programmation des scénarios de conduite. Certaines études ont également nécessité le développement de logiciels pour faciliter l'analyse des données notamment les données provenant de l'oculomètre. L'étudiant, Guillaume Desroches avait développé, sous ma supervision, un logiciel permettant l'analyse quantitative des données de l'oculomètre. J'ai par la suite développé et amélioré ce logiciel pour faire l'analyse qualitative des données oculaires.

Tous les projets ont été réalisés sous la supervision directe du Dr Normand Teasdale. Il a participé à la définition des hypothèses de recherche, à la mise en place des expérimentations, à l'analyse des données et à la rédaction des articles. Les coauteurs Dr Martin Simoneau et Dr Jean Blouin ont participé à la définition des hypothèses de recherche et à la révision des articles soumis.

Remerciements

La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans l'encadrement d'un directeur exceptionnel et le soutien et les encouragements de plusieurs personnes. Je profiterai des prochaines lignes pour les remercier.

La première personne que je me dois de remercier est le Dr Normand Teasdale. Il a été mon directeur à la maîtrise et au doctorat. Au cours de ces nombreuses années, il est devenu un ami et un modèle en tant que chercheur et en tant qu'être humain. Il est un homme de principe, de parole et de conviction comme il est peu fréquent d'en rencontrer et ses valeurs méritent tout mon respect. Depuis près de 4 ans, j'ai la chance de travailler à l'Université du Québec à Trois-Rivières avec deux anciens membres de l'équipe du Dr Teasdale et je dois avouer qu'il ne se passe pas une semaine pour ne pas dire une journée sans que nous en discussions. Nous avons tous été profondément et positivement marqués par notre passage avec le Dr Teasdale, il a influencé la suite de nos carrières et vies respectives.

Je souhaiterais également remercier mes collègues et amis de l'UQTR et tout particulièrement les membres du Groupe de Recherche en Adaptation/réadaptation Neuromusculaires qui me supportent, m'encouragent, me motivent et me tolèrent malgré les nombreux reports de dépôt de cette thèse. Merci à tous, je suis impatient d'enfin pouvoir me consacrer à 100% à l'UQTR.

Finalement, je souhaiterais remercier ma famille pour le support et les beaux moments passés en votre compagnie. J'ai la chance d'avoir une famille extraordinaire et merveilleusement unie. Je ne vous échangerais pour rien au monde.

Merci à tous.

À ma famille

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Résumé..... | i |
| Avant-propos | i |
| Remerciements..... | ii |
| Table des matières | iv |
| Liste des figures..... | v |
| Introduction..... | 1 |
| Chapitre 1 Cadre théorique..... | 4 |
| 1.1 Attention | 4 |
| 1.1.1 Historique et définition | 4 |
| 1.1.2 Théorie de l'attention..... | 5 |
| 1.1.3 Charge attentionnelle | 8 |
| 1.1.4 Vieillesse | 27 |
| 1.1.5 Vieillesse et conduite automobile..... | 35 |
| 1.1.6 Vieillesse, conduite et modification du risque : | 37 |
| 1.2 Conduite automobile..... | 44 |
| 1.2.1 Types d'études et méthodologie | 45 |
| 1.2.2 Mesures de la performance de conduite | 49 |
| 1.2.3 Évaluation des conducteurs | 50 |
| 1.2.4 Attention, distraction et conduite..... | 58 |
| Chapitre 2 Attentional demands while driving in a simulator: effects of driving straights on open roads, approaching intersections and doubling maneuvers..... | 90 |
| Chapitre 3 Aging yields a smaller number of fixations and a reduced gaze amplitude when driving in a simulator..... | 109 |
| Chapitre 4 Comparaison de patron de recherche d'informations visuelles des conducteurs jeunes et âgés en conduite simulée | 125 |
| Chapitre 5 Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity | 148 |
| Chapitre 6 Conclusion | 177 |
| Bibliographie | 184 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Nombre d'accidents par kilomètre conduit en fonction du kilométrage annuel parcouru (traduite avec permission de Langford (2006)). | 39 |
| Figure 2 : Nombre d'accidents par kilomètre conduit en fonction de l'âge des conducteurs et du kilométrage annuel parcouru (traduite avec permission de Langford (2006)). | 39 |

Introduction

Le vieillissement est une expérience irréversible vécue par tous les êtres vivants. Au Canada, des changements démographiques importants sont à prévoir au cours des prochaines années avec l'arrivée des premiers baby-boomers à l'âge de 65 ans et l'espérance de vie accrue. Pour l'être humain, le vieillissement amène des modifications importantes du comportement moteur et une dégénérescence sensorielle. Même les individus en bonne santé subissent un déclin de leur capacité et de l'un ou plusieurs des systèmes impliqués dans le contrôle moteur. Toutefois, chaque individu vieillit et subit le vieillissement d'une façon différente et à une vitesse différente.

La conduite d'une automobile s'avère à son niveau basal une tâche excessivement simple à effectuer. Il suffit de penser à la personne âgée de 90 ans qui a dû abandonner son vélo 25 ans plus tôt par manque de force et des difficultés à s'équilibrer, mais qui conduit toujours sa voiture ou encore à l'individu trop ivre pour marcher qui repart avec son véhicule pour se convaincre de cette réalité. Ce qui est plus complexe toutefois, c'est d'être un conducteur sécuritaire. Pour atteindre ce statut, le conducteur doit être prévisible par les autres utilisateurs de la route, maintenir une trajectoire et une vitesse adaptée et être en mesure de répondre adéquatement à toute situation imprévisible. De plus, il doit respecter les conventions légales et s'adapter à l'environnement. Le vieillissement et le déclin des capacités sensorimotrices ont le potentiel de faire passer un conducteur de la catégorie conducteur sécuritaire à conducteur à risque. Tout comme le nombre de personnes âgées, le nombre de conducteurs âgés est projeté d'augmenter rapidement. Étant donné la grande hétérogénéité des conducteurs âgés et le coût en terme d'autonomie et de santé physique et émotionnelle des personnes âgées à la suite de la perte du privilège de conduire (Marottoli, de Leon et al. 2000), le développement de méthodes valides d'évaluation permettant la détection des conducteurs à risque devient une priorité en terme de sécurité routière.

Le chapitre 1 présente le rationnel théorique des travaux de cette thèse en traitant globalement de l'attention, du vieillissement et de la conduite automobile. La section sur l'attention traite plus spécifiquement des théories de l'attention et de la caractérisation de la charge cognitive en présentant notamment les différentes méthodes disponibles et leurs avantages et désavantages. La section sur le vieillissement traite du vieillissement normal et

de ses effets sur les systèmes cognitif, sensoriel et moteur. Une revue de la littérature sur les conducteurs âgés y est également proposée. Dans la dernière section de ce chapitre, la conduite automobile est traitée sur plusieurs fronts incluant l'évaluation des conducteurs et la mesure de la performance de conduite. La partie principale de cette section est toutefois consacrée à l'attention et aux distractions en conduite autant d'un point de vue expérimental qu'épidémiologique.

Cette thèse est basée sur une série d'études publiées ou soumises pour publication. Ces manuscrits sont présentés intégralement (chapitre 2 à 5) et constituent le corps de cette thèse. Le chapitre 2 présente une première étude sur le développement d'une méthode efficace et non intrusive pour quantifier la charge cognitive des conducteurs. Cette première étape était nécessaire pour la mise en place des études subséquentes. La méthode développée pour quantifier la charge cognitive des conducteurs en simulateur s'est avérée efficace et non intrusive. Cette étude nous a permis d'établir que la conduite n'était pas une tâche automatique et que certains contextes de conduite comme les intersections pouvaient entraîner une augmentation considérable de la charge cognitive.

Le chapitre 3 présente une étude où nous avons quantifié les mouvements oculaires des conducteurs jeunes et âgés. Une analyse de la littérature scientifique sur ce sujet montre que la majorité des études ont été réalisées à partir de scènes de conduite ou dans le meilleur des cas de séquences vidéo de situations de conduite. Notre étude se démarque puisqu'elle a été réalisée en simulateur de conduite où des situations variées et normales de conduite ont été présentées. Dans l'ensemble, les personnes âgées ont montré plusieurs indicateurs d'une vision « tunnelaire » dans les contextes de conduite complexes tels que la négociation d'une intersection. Cependant, la méthode d'analyse des mouvements oculaires employée a montré des limitations importantes pour l'évaluation de contextes dynamiques et il nous a été impossible de déterminer si les comportements adoptés par les conducteurs âgés étaient favorables ou défavorables pour la sécurité routière.

Le chapitre 4 présente une étude où nous avons quantifié les mouvements oculaires des conducteurs jeunes et âgés, mais où la méthode d'analyse a été complètement différente. La méthode utilisée consiste à analyser chacune des fixations oculaires effectuées et à leur attribuer un code en fonction de la région et du type d'objet fixés. À partir de cette

codification, deux matrices de Markov ont été constituées et analysées. La première matrice (M0) est une matrice contenant la distribution des fixations par région et par type d'objet alors que la deuxième matrice (M1) est constituée de la distribution des transitions entre deux combinaisons objet-type. Ce type d'analyse permet de mettre en évidence les stratégies de recherche d'informations mise en place par les conducteurs et d'évaluer la robustesse de ces stratégies lorsque la charge cognitive augmente. En principe, un conducteur expérimenté et en contrôle de la situation devrait montrer des patrons de recherche d'informations stéréotypés et orientés par la connaissance des situations de conduite et l'anticipation des situations à venir. À l'opposé, un conducteur inexpérimenté devrait montrer des stratégies de recherche d'informations périphériques désorganisées et très peu stéréotypées en plus d'un champ visuel rétréci. Dans l'ensemble, les conducteurs âgés se sont comportés comme les jeunes conducteurs et ont montré des patrons de recherche d'informations stéréotypés. Les expériences vécues par les conducteurs âgés semblent leur permettre de compenser efficacement certains déficits liés au vieillissement normal en améliorant l'image qu'ils se font d'une situation (représentation cognitive).

Le chapitre 5 présente une étude portant sur la charge cognitive des conducteurs âgés dans différents contextes de conduite simulés. Cette étude a montré que la charge cognitive des conducteurs âgés augmentait disproportionnellement pour certains contextes de conduite complexes par rapport aux jeunes conducteurs. De plus, cette étude a permis d'observer que l'augmentation de la charge cognitive amène des modifications des comportements des conducteurs comme, par exemple, les stratégies de freinage. Ces résultats sont très importants puisqu'ils permettent d'établir un lien direct entre la charge cognitive d'un conducteur et sa performance de conduite, et ce, même dans des situations normales de conduite (aucune situation d'urgence exceptionnelle) ou toutes les distractions des conducteurs ont été contrôlées.

Finalement, le chapitre 6 présente la discussion et les principales conclusions qui découlent des études qui ont été réalisées dans cette thèse.

Chapitre 1 Cadre théorique

1.1 Attention

1.1.1 Historique et définition

Au 19^{ème} siècle, la psychologie a émergé comme une discipline distincte de la philosophie et l'une des raisons principales ayant mené à cette division est la méthode expérimentale utilisée par les psychologues expérimentaux de l'époque. Le thème de l'attention était déjà au cœur même de leurs discussions et ils ont décrit les propriétés structurales et temporelles de l'attention qu'ils considéraient faire parties d'un concept plus large appelé conscience. La conscience étant définie comme « ce dont nous nous rendons compte à chaque instant » (Schmidt and Lee 1999). Par la suite, l'intérêt entourant l'attention a diminué en raison de la montée du courant béhavioriste en psychologie. Il a fallu attendre la fin du 20^{ème} siècle pour que des chercheurs s'intéressent de nouveau à l'attention (Cohen and Waters 1985).

Bien que la définition de l'attention ne soit pas acceptée par tous, la plus courante mentionne que l'attention est la possibilité limitée de concentrer ou de focaliser l'activité mentale sur un point particulier, ce qui améliore la rapidité et la précision des réponses (Rigal 2002). Dans la littérature, il est souvent fait référence aux caractéristiques de l'attention. L'une de celles-ci est l'attention sélective et dirigée qui est la capacité de focalisation et d'inhibition attentionnelle (Camus 1996). L'attention focalisée peut toutefois être déplacée d'un élément à l'autre dans un laps de temps très court. Par exemple, en conduite automobile, l'attention d'un conducteur peut se déplacer du véhicule le précédant à un véhicule en direction inverse en passant par un panneau de circulation, etc. Le processus est séquentiel et l'attention focalisée ne peut en aucun cas être portée sur tous ces éléments à un instant donné. Il est possible de porter l'attention focalisée sur une chose précise ou sur une autre, mais jamais sur 2 choses au même instant. L'idée voulant que l'attention sélective soit une variable importante en conduite automobile n'est pas nouvelle. Déjà dans les années 60 et 70, de nombreux auteurs en ont discuté et ont tenté de détecter les conducteurs à risque à partir de l'évaluation de l'attention sélective (Kahneman, Ben-Ishai et al. 1973) (Babarik 1968; Mihal and Barrett 1976; Panek, Barrett et al. 1977). Tout ce

concept de l'attention sélective rejoint directement celui qui veut que l'attention soit limitée.

Une deuxième caractéristique importante de l'attention est qu'elle peut être soutenue. Cette caractéristique est importante dans les tâches nécessitant que l'attention soit portée sur un stimulus pour une longue période de temps. Toutefois, dans certaines situations, l'attention doit être portée sur plusieurs éléments simultanément faisant référence à la caractéristique nommée attention partagée. Celle-ci est particulièrement importante pour la réalisation de tâches où plusieurs stimuli doivent être traités. La conduite automobile est un bon exemple de tâche où l'attention partagée est importante. En plus de contrôler la trajectoire du véhicule, le conducteur doit contrôler les pédales et la vitesse, anticiper les déplacements des autres véhicules, surveiller les piétons, surveiller et respecter la signalisation, etc. Évidemment, chacune de ces tâches requiert des ressources cognitives et ne peut être réalisée chacune de son côté tout en utilisant la totalité des capacités attentionnelles. Toutefois, le système attentionnel permet de réaliser plusieurs tâches simultanées en diminuant le niveau d'attention dédié à chacune des tâches. Cette caractéristique de l'attention est définie comme la capacité cognitive de traiter conjointement des sources multiples d'informations. Elle impose un traitement parallèle de plusieurs types et sources d'informations.

1.1.2 Théorie de l'attention

1.1.2.1 La théorie structurale

Cette conceptualisation de l'attention veut qu'elle soit limitée et unidimensionnelle à la manière d'un scalaire. Cette limitation signifie qu'il est impossible d'effectuer plusieurs tâches concomitantes de la même façon et au même niveau que chacune de celles-ci peut l'être si elle est effectuée d'une façon indépendante. Cette théorie de l'attention provient du postulat général qui veut qu'il soit impossible à l'être humain d'effectuer ou de penser à plus d'une chose à la fois. Le raisonnement derrière cette théorie est que puisque deux tâches ne peuvent être effectuées au même instant, les ressources mentales utilisées lors de la réalisation de ces tâches sont les mêmes et provoquent la limitation. Plusieurs variantes de cette théorie ont vu le jour. La principale différence entre chacune de celles-ci étant le lieu de la limitation (entonnoir) dans le processus de traitement de l'information.

Broadbent (1958) a proposé l'un des premiers modèles de l'attention. Celui-ci suggère que chacune des informations est traitée en série et que les stimuli sont filtrés par le système perceptif grâce à l'attention. Ce modèle est constitué d'un seul canal (« single channel ») et ne possède aucun mécanisme permettant de diviser les ressources attentionnelles entre plusieurs tâches. Broadbent (1970) a modifié son modèle en proposant que l'attention sélective filtre l'information pour éviter au système attentionnel global d'être surchargé. Selon ce nouveau modèle, tous les stimuli sont traités en parallèle à un niveau pré-attentionnel. Toutefois, pour qu'une information soit réellement perçue, elle doit être analysée indépendamment par le mécanisme de l'attention sélective. La sélection simultanée de plusieurs informations entraîne une division de l'attention et un coût attentionnel plus important. De plus, chacun des éléments est moins bien traité que s'il était le seul à avoir été sélectionné.

Alors que pour Broadbent (1958) les stimuli étaient filtrés par le système perceptif, Deutsch & Deutsch (1963) ont proposé que l'étape d'acquisition sensorielle était automatique et que le filtrage était effectué au moment de la sélection de la réponse, au stade subséquent à l'analyse perceptuelle, c'est-à-dire, au moment de la sélection de la réponse. Ce modèle appelé modèle de la mémoire sélective tire son nom du fait que la sélection de la réponse succède à la perception avant l'entrée en mémoire. Ce modèle tout comme celui de Norman (Norman 1968) suggère que toutes les informations en entrée sont analysées, mais que seulement les plus pertinentes sont sélectionnées pour un traitement plus approfondi grâce au processus d'attention.

Treisman (1969) a également proposé plusieurs modifications au modèle de Broadbent en conservant toutefois les concepts fondamentaux du canal unique et de la quantité de ressources limitées. La principale modification proposée est que l'attention agirait comme fonction modératrice alors que Broadbent lui conférait un rôle de filtre. Ainsi, plutôt que de bloquer complètement les stimuli inattendus ou rejetés, l'attention atténuerait uniquement leur traitement. Le rôle de l'attention se situerait donc à l'étape finale de la perception et des processus d'analyse des informations pourraient survenir avant le filtre modulateur.

1.1.2.2 La théorie des capacités

Développée en parallèle à la théorie structurale, la théorie des capacités a amené de nombreux modèles (Knowles 1963; Kahneman 1973). Selon celle-ci, l'humain possède une capacité limitée de ressources liées au traitement de l'information. Ainsi, si une tâche primaire nécessite une quantité de ressources plus importante, les ressources disponibles pour la réalisation d'une deuxième tâche sont diminuées. Dans certains cas, la deuxième tâche peut même être impossible à réaliser si les ressources disponibles sont insuffisantes. Contrairement à la théorie structurale où une seule tâche pouvait être réalisée à la fois, la théorie des capacités permet d'allouer une certaine quantité de ressources à plusieurs tâches qui peuvent être réalisées en parallèle.

Plus précisément, Kahneman (1973), par opposition aux modèles de la théorie structurale, propose dans son modèle que la quantité des ressources disponibles varie en fonction du seuil d'activation. Selon l'auteur, la quantité de ressources est plus importante quand le seuil d'activation est élevé que lorsqu'il est bas. Ainsi, en situation d'attention partagée où les ressources cognitives sont distribuées entre plusieurs sources d'informations, les capacités augmentent jusqu'au point où la capacité maximale est dépassée. À partir de ce moment, la performance dans l'une ou plusieurs des tâches simultanées est diminuée puisque le traitement des informations résiduelles est effectué dans la limite des ressources restantes. Kahneman a également introduit l'idée de l'affectation délibérée qui signifie que la focalisation de l'attention sur les informations pertinentes à la réalisation d'une tâche permet de canaliser les ressources sur le traitement et d'ainsi améliorer la qualité de la performance. Ceci signifie également qu'en plus du processus involontaire, l'attention peut être focalisée volontairement. Finalement, le modèle de Kahneman propose qu'en situation d'attention partagée, le traitement parallèle des informations peut s'effectuer à tous les niveaux du traitement en distribuant simultanément les ressources cognitives entre plusieurs sources d'informations d'où une moins grande efficacité (plus superficielle) de traitement qui explique la diminution des performances par rapport à la situation d'attention focalisée.

1.1.2.3 La théorie des ressources multiples

Bien qu'il soit généralement associé à la théorie des capacités, le modèle de Kahneman (1973) a posé les premières bases des modèles à ressources multiples en proposant que les différentes tâches concurrençaient pour les ressources d'un même pool simultanément à une compétition pour les ressources satellites plus ou moins dédiées. L'un des principaux modèles de cette théorie a été proposé par Wickens (1984). Selon lui, il est erroné de voir l'attention comme une capacité unique, il faut plutôt la conceptualiser comme une matrice en trois dimensions constituée du niveau du traitement (perceptif ou central vs réponse), du code du traitement perceptif et central (verbal vs spatial) et de la modalité des entrées (visuelles vs auditives) et des réponses (manuelle vs vocale). Chacune de ces dimensions ou capacités permet le traitement de certains types d'informations. Ainsi, certaines tâches de nature complètement différente peuvent être effectuées simultanément sans s'affecter alors que pour d'autres tâches, il y a interférence et une baisse de la performance pour une ou plusieurs tâches. Cette interférence semble être modulée par la nature des tâches. Par exemple, cette théorie permet d'expliquer pourquoi il est possible de conduire et d'écouter la radio sans qu'il y ait d'interférence entre les tâches alors qu'une discussion au téléphone cellulaire interfère avec la conduite (Strayer and Johnston 2001; Hancock, Lesch et al. 2003; Harbluk, Noy et al. 2007).

1.1.3 Charge attentionnelle

Depuis plus de 30 ans, la communauté scientifique a montré beaucoup d'intérêt pour le concept de charge attentionnelle mis en relation avec la complexité de la tâche (Wickens and Hollands 2000). Knowles (1963) a même présenté une définition de travail de la charge attentionnelle qui reflète très bien l'état d'esprit des premiers chercheurs qui ont tenté de la mesurer. Cette définition est : « How busy is the operator? ». L'importance de quantifier la charge attentionnelle provient du désir de maximiser ou d'optimiser les interactions entre l'homme et la machine. Il est primordial de bien connaître les capacités et limitations de l'homme pour s'assurer de spécifier une charge de travail raisonnable et sécuritaire (Ogden, Levine et al. 1979).

Une multitude de techniques ont été utilisées pour quantifier la charge attentionnelle et particulièrement les surcharges. Toutes ces techniques peuvent être classées dans quatre

grandes catégories : les mesures de la tâche primaire et de la tâche secondaire, les mesures subjectives (autorapportée) et les mesures de paramètres physiologiques (O'Donnell and Eggemeier 1986).

1.1.3.1 Caractérisation de la charge attentionnelle

Il y a une variété impressionnante de méthodes et techniques pour quantifier la charge attentionnelle incluant des méthodes subjectives, physiologiques ou de mesure de la performance (Ogden, Levine et al. 1979). Les conséquences associées à la sélection d'une méthode de mesure non optimale sont très sérieuses. La sélection d'une technique trop peu sensible aux variations de la charge cognitive pourrait masquer les véritables variations. De même, la sélection d'une méthode intrusive peut altérer la performance et invalider l'évaluation de la charge attentionnelle de la tâche évaluée parce que le travailleur/conducteur se comporte différemment de son habitude (Casali and Wierwille 1983).

Le domaine de l'aviation a été précurseur dans le développement de techniques pour l'évaluation de la charge attentionnelle comme en témoignent les nombreuses publications sur le sujet (Wierwille 1979; Casali and Wierwille 1984; Sterman and Mann 1995; Lee and Liu 2003). Plusieurs de ces publications sont d'ailleurs perçues comme des classiques de la psychologie en ce qui concerne la charge mentale et l'attention.

1.1.3.2 Interférences

Avant de présenter sommairement chacune des techniques de mesure de la charge attentionnelle, il est pertinent de présenter les concepts d'interférence et d'interférence structurale. Ceux-ci auront une importance primordiale dans le choix de la technique utilisée pour la quantification de la charge cognitive en conduite automobile. L'interférence est définie comme un changement artificiel dans la réalisation d'une tâche. Changement qui survient uniquement en raison de l'introduction de la technique d'estimation de la charge attentionnelle (Casali and Wierwille 1984). Dans le cas où la technique est intrusive et qu'elle modifie la performance, des comportements non typiques peuvent survenir et dans le cas de certaines activités comme la conduite automobile ou le pilotage d'un avion, des comportements non sécuritaires peuvent être observés. Casali & Wierwille (1984) ont d'ailleurs suggéré d'appliquer dans un premier temps les techniques en simulateur et

d'ainsi éviter tout problème de sécurité. Une mesure de base de la tâche primaire peut également être comparée à une mesure de base de la tâche primaire ajoutée à la technique d'estimation. Si les résultats entre les deux mesures sont différents, c'est que la technique d'estimation cause une interférence. L'interférence entre deux ou plusieurs tâches ne survient pas toujours en raison d'un problème de capacité (interférence de capacité). Dans certains cas, l'interférence est causée par deux structures physiques ou neurologiques qui entrent en conflit. Par exemple, le fait de tenir un cellulaire dans sa main droite peut amener des difficultés à changer les vitesses d'une voiture à transmission manuelle. Une diminution de la performance de conduite s'en suivra, mais cette perte de performance n'est pas causée par un manque de capacités cognitives, mais simplement par le fait que la main ne peut faire deux choses en même temps. Ce type d'interférence est appelé interférence structurale et il est fréquent d'en observer dans les études sur la charge attentionnelle en conduite automobile où les chercheurs introduisent fréquemment une tâche secondaire de recherche d'informations visuelles. Évidemment, cette recherche visuelle diminue la performance de conduite en causant une interférence structurale puisque l'axe du regard du conducteur se promène sur les cibles alors qu'il devrait être sur la route en temps normal.

1.1.3.2.1 Mesures subjectives

Les mesures subjectives tentent de quantifier l'effort fourni lors d'une tâche. Dans le milieu industriel, l'opinion du travailleur s'avère dans bien des cas le meilleur indicateur de la sécurité d'une tâche. À cet égard, il est fort possible qu'en conduite automobile, le meilleur indicateur de sécurité soit l'opinion du conducteur. Il y a toutefois un consensus voulant que la charge cognitive soit multidimensionnelle. Des outils plus élaborés doivent donc être utilisés pour la quantifier. La majorité de ces outils de mesure sont construits sous forme de questionnaires et utilisent des échelles numériques ou des indicateurs indirects de phénomènes physiologiques ou de la performance à la réalisation d'une tâche (Boles, Bursk et al. 2007). L'un des premiers questionnaires a été développé pour la tâche de pilote d'avion en 1969 par Cooper et Harper (1969). Ce questionnaire a par la suite été universalisé par Casali et Wierwille (1983) et par Hill (1992). Même si ces trois questionnaires semblaient hautement sensibles à tout changement de la charge cognitive lors d'une tâche simple, son utilisation est demeurée très limitée en recherche. Plus récemment, trois questionnaires ont été largement diffusés et utilisés pour la quantification

de la charge attentionnelle. Il s'agit du « Subjective Workload Assessment Technique » (SWAT), du « NASA Task Load Index » (NASA-TLX) et de l'« Overall Workload » (OW). Ces trois questionnaires évaluent la dimension psychologique associée à la charge de travail en évaluant notamment le niveau de stress et de frustration, la durée de la charge de travail et l'effort mental. De plus, le NASA-TLX évalue subjectivement la demande physique et la performance (Boles, Bursk et al. 2007). Ces trois tests ont montré leur validité à plusieurs reprises et permettent d'estimer les variations de la charge de travail lors de la réalisation d'une tâche simple dont certains paramètres sont modifiés pour en faire varier la difficulté (Svensson, Angelborg-Thanderz et al. 1997; Miyake 2001; Otmani, Pebayle et al. 2005). Lee and Liu (2003) ont comparé le NASA-TLX à des variables physiologiques comme la fréquence cardiaque résiduelle et la variabilité du rythme cardiaque lors de différentes phases d'un vol (décollage, vol, approche, atterrissage) et ont conclu que le NASA-TLX était suffisamment sensible pour caractériser les changements de la charge attentionnelle associés à ces différentes phases. Dans un contexte où la sensibilité, la validité et l'acceptation de l'opérateur étaient les critères de sélection, le NASA-TLX et l'OW se sont avérés supérieurs au SWAT et au Cooper-Harper modifié (Hill, Iavecchia et al. 1992).

Les techniques subjectives ont plusieurs avantages, mais les deux plus importants sont qu'elles ne sont pas intrusives et qu'elles sont peu dispendieuses (Casali and Wierwille 1984). Cependant, deux critiques importantes limitent leur utilisation. La première critique est que la majorité de ces évaluations subjectives surviennent à la suite d'un vol dans le cas des pilotes ou à la suite d'un événement important dans les autres contextes. Dans tous les cas, il s'agit d'un résultat moyen reflétant l'état cognitif pour une période de temps donnée. Toutefois, dans une tâche complexe et délicate comme la conduite d'une automobile, une erreur importante survenant en fin de parcours peut amener de la frustration et influencer à la hausse l'évaluation subjective de la charge de travail. En réalité, sans cette erreur, l'évaluation subjective aurait été beaucoup plus basse (Miyake 2001). De plus, les informations reflétant la charge cognitive instantanée ne sont pas disponibles avec ces évaluations (Lee and Liu 2003). Une autre critique importante concerne leur validité lors de situations de double tâche (Boles, Bursk et al. 2007). D'après Boles et al. (2007), ses évaluations ont bien démontré leur validité pour estimer les dimensions psychologiques

globales comme l'effort et le stress, mais ne permettent pas d'évaluer spécifiquement la charge de travail en fonction des ressources spécifiques utilisées (vision, audition, etc.) comme l'a suggéré Wickens (1976). Cette limitation amène donc beaucoup de variabilité au niveau de la charge de travail. Toujours selon Boles et al. (2007), un questionnaire subjectif idéal devrait mesurer tous les processus mentaux indépendamment. Le problème avec cette suggestion est que près d'une quinzaine de processus ont été identifiés (Boles and Law 1998). Malgré tout, Boles et al. (2007), ont publié un nouveau questionnaire appelé le Multiple Ressources Questionnaires (MRQ) pour l'évaluation des ressources spécifiques à la charge de travail. Ce questionnaire ne prend que quelques minutes à administrer et évalue dix-sept ressources différentes. De plus, il a démontré beaucoup de potentiel à différencier les ressources impliquées dans la charge de travail (Boles, Bursk et al. 2007). Malgré les belles promesses montrées par ce questionnaire pour l'évaluation de la charge cognitive, quelques auteurs ont déjà manifesté leurs réserves et publiés leurs critiques (Vidulich and Tsang 2007; Wickens 2007). Celles-ci concernent principalement la méthodologie et les tâches utilisées lors des expérimentations de validation limitant la généralisation du questionnaire aux tâches du monde réel. Certaines critiques portent également sur les fondements théoriques utilisés pour développer le questionnaire et particulièrement sur les dix-sept ressources cognitives évaluées.

1.1.3.2.2 Mesures de la performance: tâche simple, double tâche et tâche secondaire

La mesure de la performance de la tâche principale est une technique souvent utilisée pour quantifier la charge cognitive. Cette technique consiste à mesurer une ou des variables de la performance dans différents contextes (environnement différents, paramètres différents etc.). La liste des variables de performance est pratiquement infinie et varie en fonction de la tâche mais peut, par exemple, inclure la fréquence d'utilisation des contrôles d'un véhicule, la variabilité du déplacement latéral d'un avion ou d'une voiture etc. Cette méthode a l'avantage de ne pas être intrusive au niveau de la tâche principale, le risque d'interférence avec une autre tâche est ainsi limité.

L'exécution d'une deuxième tâche concomitante à une tâche principale est une méthode répandue pour l'évaluation de la charge attentionnelle. Cette deuxième tâche peut être définie comme secondaire ou double. La différence entre ces deux protocoles concerne

l'importance accordée à la deuxième tâche. Dans un protocole de tâche secondaire, le participant reçoit pour consigne de favoriser en tout temps la tâche primaire alors que pour le protocole double-tâche, les deux tâches ont la même importance. La performance de la tâche secondaire réalisée de façon indépendante est comparée au niveau obtenu quand celle-ci est réalisée simultanément à la tâche primaire. La différence entre les deux performances est une mesure de la charge attentionnelle imposée par la tâche primaire (Ogden, Levine et al. 1979). La mesure de la performance de la tâche secondaire s'est avérée une méthode efficace et sensible pour l'évaluation de la charge attentionnelle dans des contextes de conduite automobile (Ogden, Levine et al. 1979; Casali and Wierwille 1984; Teasdale, Cantin et al. 2004). Selon Ogden (1979), plusieurs types de décision peuvent être pris suite à l'évaluation de la performance lors de la double tâche. Plusieurs exemples sont disponibles dans la littérature comme le classement des difficultés de la tâche primaire (Knowles 1963; Michon 1966; Teasdale, Cantin et al. 2004), l'évaluation d'instrumentation, l'évaluation de procédures et l'évaluation des effets de la pratique (Bahrick, Noble et al. 1954).

Plusieurs tâches différentes ont été utilisées comme tâche secondaire au cours des années. Ces tâches sont généralement de deux types : continue ou discrète. Le type continu nécessite que la tâche soit exécutée en continu pendant toute la durée de la performance. Par exemple, Casali et Wierwille (Casali and Wierwille 1984) ont demandé à des pilotes d'avion de taper du doigt (tâche secondaire) à un rythme de deux tapes par seconde tout en pilotant (tâche primaire). L'intervalle de temps entre chacune des tapes a été quantifié et la variabilité de celui-ci a été utilisée comme mesure de la performance. Plus la tâche principale était chargeante au niveau cognitif et plus l'intervalle de temps entre 2 tapes était variable. Le type discret consiste à envoyer un stimulus à différent instant du déroulement de la tâche primaire. Une réponse doit être fournie le plus rapidement possible suite à chacun des stimuli. Le stimulus est généralement auditif ou visuel alors que la réponse est souvent manuelle ou vocale. Ce protocole est également appelé « Probe Reaction Time Technique » (PRTT). Cette technique assume que les ressources sont limitées (Kerr 1973). Si les ressources requises pour l'exécution de la tâche primaire sont peu importantes, une quantité plus importante de ressource sera disponible pour la réalisation de la tâche secondaire et la performance lors de celle-ci devrait être bonne. Par contre, si la tâche

primaire nécessite une quantité importante de ressources cognitives, la performance de la tâche secondaire devrait être diminuée (i.e. augmentation du temps de réaction).

Il y a plusieurs problèmes associés à la PRTT. Le plus important concerne la prémisse de base qui veut que les ressources soient limitées. Ainsi, cette technique ne tient pas compte de la théorie des ressources multiples de Wickens (1984) et du modèle de Kahneman (1973) qui proposent une certaine flexibilité au niveau de la capacité des ressources. Un deuxième problème important concerne les interférences pouvant survenir entre les deux tâches. La sélection d'un type de réponse à la tâche secondaire n'interférant pas avec la tâche primaire est donc un facteur important et non-négligeable avec cette technique.

Une tâche de recherche d'informations visuelles appelée tâche de détection de cible périphérique (TDCP) est fréquemment utilisée comme tâche secondaire (Patten, Kircher et al. 2004; Tornros and Bolling 2005). Cette tâche consiste à allumer des cibles se trouvant en périphérie du champ visuel du participant et celui-ci doit signifier la détection de la cible par une réponse vocale ou manuelle. Le temps de réaction associé à la détection des cibles est utilisé comme indicateur indirect de la charge attentionnelle en conduite (Crundall, Underwood et al. 1999; Patten, Kircher et al. 2004). La majorité des informations nécessaires pour la conduite automobile sécuritaire est fournie par le mouvement des yeux du conducteur qui balaie l'environnement. Les informations somatosensorielles et auditives sont également importantes mais à un moindre degré. L'importance de la perception visuelle en conduite suggère qu'une tâche secondaire visuelle est appropriée pour quantifier la charge cognitive et que toutes diminutions ou augmentations de celle-ci devraient être perçues (Patten, Kircher et al. 2004). Pour faire cette affirmation, Patten s'est basée sur la théorie des ressources multiples de Wickens (1984). Selon cette théorie, des modalités différentes (visuelles, auditives, tactile etc), nécessitent des ressources attentionnelles différentes. Deux tâches utilisant des modalités différentes pourraient ainsi être réalisées en parallèle sans que la performance de l'une ou l'autre en soit affectée. En conduite, l'utilisation d'une tâche visuelle permettrait, selon ce point de vue, de mieux quantifier la charge attentionnelle associée à la conduite. Toutefois, il faut se rappeler qu'une tâche secondaire ne doit pas affecter ou modifier la tâche primaire (Schmidt and Lee 1999). La

TDCP modifie les comportements oculaires des conducteurs et affecte, sans doute, la performance en conduite en causant une interférence structurelle.

1.1.3.2.3 Mesures physiologiques

L'attention nécessite des ressources et demande un effort cognitif. Cet effort se révèle aux niveaux de certaines variables physiologiques qui permettent de quantifier l'attention ou la charge cognitive. Plusieurs mesures physiologiques sont sensibles à des variations de la charge attentionnelle et du niveau d'éveil. L'avantage principal des mesures physiologiques est qu'elles n'impliquent aucune réponse supplémentaire de la part du sujet ce qui fait que le risque d'interférence avec la tâche principale est très faible. De plus, la majorité des mesures physiologiques peuvent être acquises en continu et refléter le niveau de la charge attentionnelle instantanément. Les principaux désavantages sont l'utilisation d'équipements souvent onéreux, l'expertise technique nécessaire pour utiliser les équipements et traiter les signaux et le grand nombre de facteurs confondants pour chacun de ses signaux. Kahneman (1973) a proposé trois conditions pour qu'une mesure physiologique soit un indice valide pour quantifier la charge attentionnelle. Premièrement, la mesure physiologique doit être sensible aux variations de la demande de la tâche suite à une variation des paramètres de celle-ci. Deuxièmement, les mesures doivent refléter les différences entre des tâches différentes qui requièrent des ressources cognitives différentes. Finalement, les mesures doivent être sensibles aux variations individuelles au niveau du traitement des informations puisque des individus de différents niveaux d'habileté cognitive performant différemment.

Les mesures provenant de deux structures anatomiques distinctes sont utilisées comme variables physiologiques. Ces deux structures sont le système nerveux central (SNC) qui est composé du cerveau, du cervelet, du tronc cérébral et de la moelle épinière et le système nerveux périphérique (SNP) qui est composé des nerfs crâniens et des nerfs rachidiens. Le SNP peut être subdivisé en deux sous-éléments, le système nerveux somatique (SNS) et le système nerveux autonome (SNA). Le SNA peut à son tour être subdivisé en deux, le système sympathique et le système parasympathique. Le SNS comprend l'ensemble des structures qui permettent de connaître et d'être informé sur son environnement (neurones sensitifs reliés aux différents récepteurs sensoriels) et de réagir en fonction de celui-ci (neurones moteurs responsables des contractions musculaires volontaires). Il inclut

également les neurones impliqués dans la tonicité musculaire (involontaire). Le SNA contrôle et régule les organes internes et ses actions sont involontaires contrairement au SNS. Le SNA peut également être subdivisé en deux entités distinctes, le système sympathique et le système parasympathique. Le système sympathique est associé à la fuite et aux mesures d'urgence, il accélère les fonctions (fréquence cardiaque, rythme respiratoire et circulatoire etc.). Le système parasympathique qui innerve les mêmes organes ralentit les fonctions et est directement associé au maintien des ressources de l'organisme telles que la digestion et la défécation (Rigal 2002). Les mesures physiologiques décrites ci-dessous sont associées et régulées par l'un ou plusieurs de ces systèmes. Par exemple, le diamètre de la pupille, la fréquence cardiaque et la respiration sont contrôlés par le SNA alors que les signaux électro-oculographiques (EOG) et électro-encéphalographiques (EEG) sont régulés par le SNC (De Waard 1996). Ainsi, chacune des méthodes présentées ci-dessous tente de mesurer indirectement la variation de l'un de ces systèmes en mesurant une ou plusieurs variables physiologiques.

1.1.3.2.3.1 Mouvements et comportements oculaires

Le diamètre de la pupille est l'une des nombreuses variables utilisées pour quantifier la charge attentionnelle. Le diamètre de la pupille diminue sous l'activité du système nerveux parasympathique alors qu'il augmente sous l'activité du système sympathique. Une augmentation de la charge attentionnelle devrait donc amener une dilatation de la pupille. Plusieurs études ont d'ailleurs confirmé cette hypothèse (Kahneman 1973) (Beatty 1982; Casali and Wierwille 1983; Hyona, Tommola et al. 1995; Tsai, Viirre et al. 2007). La majorité de ces études ont été réalisées dans des contextes bien différents les uns des autres mais l'environnement est toujours très bien contrôlé. L'instrumentation et particulièrement les caméras utilisées pour quantifier cette variable se sont beaucoup améliorées depuis les premières études utilisant cette technique (Casali and Wierwille 1983). La principale limite demeure toutefois que les principaux facteurs affectant la dimension de la pupille ne sont pas la charge cognitive mais bien le niveau de luminosité et l'accommodation visuelle (Kramer 1991). Ces facteurs rendent cette technique pratiquement inutilisable à l'extérieur d'un laboratoire mais également en simulateur de conduite et de pilotage où le niveau de luminosité de la scène présentée varie continuellement.

Les clignements endogènes des yeux sont des mouvements involontaires qui permettent de lubrifier la cornée et qui peuvent être distingués des autres clignements (réflexes et volontaires) par l'absence d'un stimulus identifiable (Stern, Walrath et al. 1984). Depuis les travaux de Ponder et Kennedy (1927), il est admis que les besoins physiologiques de l'œil (lubrification, protection, inondation avec pour objectif l'expulsion d'un corps étranger etc.) ne permettent pas à eux seuls d'expliquer la fréquence et les caractéristiques des clignements des yeux. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer les mécanismes sous-tendant les clignements des yeux, mais aucune de ces hypothèses n'a pu s'imposer définitivement. Il semble toutefois y avoir consensus pour admettre que les clignements reflètent l'influence de processus nerveux supérieurs (Ponder and Kennedy 1927; Stern, Walrath et al. 1984; Fogarty and Stern 1989).

Une relation inverse a régulièrement été observée entre la charge cognitive et la fréquence des clignements (Drew 1951; Baumstimler and Parrot 1971; Bauer, Goldstein et al. 1987; Hyona, Tommola et al. 1995). Cette diminution de la fréquence des clignements est souvent attribuée à la nécessité de perdre le moins d'informations possibles (Drew 1951; Baumstimler and Parrot 1971). Le fait de cligner des yeux cause une perte temporaire d'informations visuelles puisque la paupière crée une interférence physique entre le stimulus et l'œil. La perte d'informations ne se limite pas à la durée du clignement puisqu'il semble également y avoir une perte d'informations qui précède celui-ci (Volkman, Riggs et al. 1980; Volkman 1986). L'un des avantages intéressants de l'utilisation des clignements endogènes des yeux pour la quantification de la charge cognitive est que cette technique permet d'obtenir un niveau de base qui pourra, par la suite, servir de référence (Stern, Walrath et al. 1984). Les principales variables utilisées sont la fréquence, la durée et l'intervalle de temps entre chacun des clignements. Il est également possible de mesurer la durée de fermeture (Veltman and Gaillard 1998). Une augmentation de la fréquence de clignement des yeux est associée à une perte de vigilance et à un niveau d'éveil à la baisse alors qu'une diminution de la fréquence a été observée lors de tâches complexes par rapport à une tâche simple (Kramer, Sirevaag et al. 1988; Neumann 2002). Cette technique s'avère beaucoup moins efficace pour quantifier les surcharges attentionnelles. À cet effet, Veltman et Gaillard (1996) ont montré que la durée et l'intervalle de temps entre les clignements étaient sensibles aux changements de la charge visuelle. Si la charge visuelle augmente, la

fréquence des clignements diminue et lorsqu'un clignement survient tout de même, il est de plus courte durée. Cependant quand la charge attentionnelle est à son tour modifiée par l'introduction d'une tâche secondaire, aucun changement n'a été observé au niveau des clignements des yeux. Sirevaag (1993) et Goldstein (1992) en étaient arrivés au même constat quelques années plus tôt. Bien que la charge cognitive et la charge visuelle soient bien souvent directement liées, ce n'est pas toujours le cas et la prudence est de mise dans l'interprétation des clignements endogènes des yeux.

En plus de la charge cognitive, la mesure des clignements des yeux s'est avérée utile et valide pour quantifier le niveau d'éveil et la fatigue (Stern, Boyer et al. 1994). Cette technique a notamment été utilisée pour quantifier le niveau de fatigue des routiers (Lal and Craig 2002) et des systèmes embarqués à l'intérieur des véhicules ont d'ailleurs été développés.

Aux processus supérieurs présentés ci-dessus, il faut ajouter la qualité de l'air et les facteurs intra individuels comme facteurs modulant la fréquence et la durée des clignements. De plus, comme les clignements des yeux peuvent être volontaires (p. ex. clin d'œil) ou déclenchés par une réaction réflexe provoquée (p. ex. stimulation lumineuse ou corps étranger provoquant un clignement), la variabilité des résultats est importante et les différences difficiles à percevoir dans des contextes non contrôlés. Il semble également que la fréquence des clignements augmente en fonction de la durée de la tâche (Stern, Boyer et al. 1994). La raison de cette augmentation est inconnue, mais Fukuda et al. (2005) ont suggéré que ce résultat pourrait provenir d'une diminution de l'habileté à inhiber les clignements. Globalement, tous ces facteurs affectent la qualité de la mesure lorsque les clignements endogènes sont utilisés pour quantifier la charge cognitive (Stern, Walrath et al. 1984).

Plusieurs techniques permettent l'enregistrement des clignements, les trois principales sont l'électrooculographie (EOG), l'oculométrie (réflexion cornéenne) et l'enregistrement vidéo. Bien qu'elle soit plus intrusive que les deux autres, l'EOG constitue la méthode de référence puisqu'elle nécessite la pose de deux électrodes qui permettent d'évaluer la différence de potentiel entre la cornée et la rétine de l'œil. Si l'objectif est de mesurer les clignements des yeux, les électrodes doivent être positionnées au-dessus et en dessous de l'œil. En se

déplaçant sur la cornée, la paupière agit comme une résistance qui altère le potentiel électrique de base entre la cornée et la rétine. Cette variation de potentiel et la forme de l'onde produite permettent d'identifier facilement et rapidement le clignement à partir des signaux EOG. L'oculométrie est également un excellent moyen pour quantifier la fréquence des clignements. Comme cette technique consiste à comparer la position de la pupille à celle d'une réflexion cornéenne pour en extraire les mouvements oculaires, la non-détection de la pupille par l'obstruction de la paupière permet l'identification des clignements. Finalement, l'enregistrement de séquences vidéo de l'œil peut également être utilisé. Jusqu'à tout récemment, cette technique était la moins précise et la plus fastidieuse des trois puisqu'elle nécessitait le dépouillement image par image des séquences vidéo. Toutefois, le système FaceLAB (seeing machines) a complètement révolutionné cette technique et s'impose dorénavant comme la nouvelle méthode de référence en raison de la facilité de son utilisation dans des environnements contrôlés et non contrôlés ce qui en fait un système excessivement versatile.

Dans les tâches comme la conduite automobile ou le pilotage d'un avion, la vision est la méthode dominante d'extraction de l'information et les fixations et stratégies oculaires peuvent fournir des indications importantes sur les informations perçues et la charge attentionnelle (Ogden, Levine et al. 1979). Les fixations oculaires et les mouvements des yeux peuvent également être enregistrés par les techniques d'oculométrie ou d'EOG. Toutefois, l'EOG est une technique qui nécessite de fréquentes calibrations et l'usage d'une paire d'électrodes par dimension analysée ce qui peut être légèrement intrusif pour le sujet. Peu importe la technique utilisée, la troisième dimension (profondeur) est impossible à obtenir ce qui est un désavantage important pour les environnements en 3 dimensions ou encore dans des situations réelles comme la marche ou la conduite automobile. La majorité des études qui ont analysé les comportements oculaires en conduite l'ont fait avec des oculomètres qui nécessitent souvent le port d'un casque sur lequel des lentilles et des caméras sont fixées (Olsen, Lee et al. 2005). Les oculomètres sont beaucoup moins intrusifs de nos jours, certains modèles peuvent être déposés à l'avant du sujet ou même être intégrés dans le tableau de bord d'un véhicule.

La principale difficulté associée à l'analyse du regard est que cette technique ne tient pas compte du niveau d'attention du sujet évalué, il devient ainsi impossible de déterminer si l'individu perçoit ce qu'il fixe du regard. Par exemple, imaginons l'analyse du regard d'un individu distrait ou absorbé par autres choses. Les fixations oculaires calculées à partir des signaux fournis par l'oculomètre seraient longues et fort possiblement que l'environnement serait interprété comme complexe puisque les longues fixations caractérisent généralement ce genre de situation. En réalité, l'individu étant absorbé par ses pensées n'a aucunement conscience de ce qu'il regarde. Cet exemple illustre bien que toutes les fixations ne sont pas pertinentes, que la vision n'implique pas nécessairement qu'il y a eu perception et qu'il est impossible de déterminer si un individu perçoit ce qu'il fixe du regard (De Waard 1996).

Plus récemment, le réflexe de peur («startle reflex») qui est une réponse complexe qui suit la présentation d'un stimulus soudain et d'intensité modérée a également été utilisé pour quantifier la charge attentionnelle. Chez l'humain, la composante la plus fiable de ce réflexe est le clignement des yeux qui s'enregistre par électromyographie du muscle orbiculaire de l'œil et qui survient entre 20 et 70 ms suite à la présentation d'un stimulus. La réponse est quantifiée par l'amplitude de la réponse électromyographique et le délai entre le stimulus et le début du clignement (Neumann 2002). Le stimulus peut être de différents types incluant un son, un flash lumineux ou encore une tape sur le front. Cette méthode s'est avérée sensible aux modifications de la charge cognitive lors d'une tâche continue, simple et complexe (Neumann 2002). Dans cette étude de Neumann (Neumann 2002), la tâche simple était une tâche de poursuite visuelle où le sujet tentait de maintenir un cercle autour d'une croix alors que celui-ci se déplaçait horizontalement sur un écran d'ordinateur. Le cercle pouvait être déplacé par le participant à l'aide d'un joystick. La tâche complexe consistait à effectuer la tâche de poursuite tout en surveillant une série de contrôles. Si l'un des contrôles atteignait une zone critique, le sujet devait utiliser une souris avec la main droite pour replacer le contrôle. Les sujets avaient reçu pour consigne de privilégier en tout temps la tâche de poursuite visuelle. Lors de certains essais pour chacune des conditions, un stimulus sonore était présenté pour déclencher le réflexe. Le sujet devait continuer l'exécution des tâches en cours sans broncher. À priori, cette méthode semble prometteuse, plusieurs questions demeurent toutefois en suspend suite à l'étude de Neumann. Premièrement, comme le stimulus doit être suffisamment important et

soudain pour déclencher la réponse réflexe de clignement des yeux et que ce stimulus doit être auditif ou visuel, il est probable qu'il cause une interférence et une diminution de la performance de la tâche primaire. Deuxièmement, il est actuellement impossible de déterminer si les effets observés dans l'étude de Neumann le seront également avec une autre combinaison stimulus-tâche primaire. Troisièmement, il n'est pas connu si cette méthodologie est utilisable pour une tâche primaire nécessitant des ressources visuelles et auditives comme la conduite automobile par exemple. Néanmoins, il s'agit d'une méthode intéressante même si elle est intrusive pour le sujet. L'avenir nous dira si elle est valide et utilisable dans des contextes plus écologiques.

L'électro-encéphalographie (EEG) est l'enregistrement des activités électriques corticales au moyen d'électrodes de surface posées sur le scalp. Les activités électriques corticales proviennent du thalamus et sont caractérisées par leur amplitude et leur fréquence. Tous les états de vigilance (attentif, fatigue, etc.) possèdent des rythmicités différentes qu'il est possible de quantifier. La quantification de ces rythmicités et les changements associés des différents patrons d'activation procurent un index biologique de l'engagement fonctionnel et des ressources cognitives allouées à une tâche (Sterman and Mann 1995). L'EEG a été définie par quatre bandes de fréquence distinctes incluant la bande delta (0-4 Hz), la bande theta (0-8 Hz), la bande alpha (8-13 Hz) et la bande beta (13-20 Hz) (Cooper, Osselton et al. 1974). Une augmentation de la puissance de la bande alpha et de la bande theta est un indice de l'augmentation de la somnolence (Kecklund and Akerstedt 1993; Horne and Reyner 1996). Toujours dans un objectif de quantification de la somnolence, Horne et Reyner (1996) ont proposé d'ajouter les bandes alpha et theta puisque certains individus montrent une augmentation de la puissance pour seulement l'une des deux bandes. L'EEG a le potentiel de devenir la méthode de référence pour la détection de changement au niveau de la vigilance et de l'état d'alerte (Lal and Craig 2001) et a été utilisée avec succès pour évaluer la charge de travail d'opérateurs (Eggemeier and Wilson 1991) et de pilotes (Dussault, Jouanin et al. 2005). La vigilance et la fatigue sont deux concepts étroitement liés, un individu mentalement fatigué étant incapable de maintenir un haut niveau de vigilance dans une tâche de conduite. Cette perte de vigilance se répercute au niveau de l'EEG par des changements significatifs des bandes alpha, delta et theta (Lal and Craig 2001). À la suite de ses travaux et d'une revue de littérature des études récentes

en EEG, Serman (1995) a suggéré que le codage sensoriel était associé à une atténuation des hautes fréquences (11-15 Hz) alors que le traitement cognitif était associé à une atténuation de la bande alpha. Les mouvements, qu'ils soient ou non reliés à la tâche, produisent une activation du cortex sensori-moteur affectant principalement les hautes fréquences de la bande alpha et les fréquences adjacentes de la bande beta. Dans une étude associée à la fatigue des conducteurs, Lai et Craig (2001) ont observé que les bandes delta et theta augmentaient de 22 % et 26 %, respectivement, pour l'ensemble des électrodes lors de la transition vers la fatigue. L'activité des bandes alpha et beta ont subi une augmentation moins importante de 9 % et 5 % respectivement. Finalement, à la suite de deux études récentes, Dussault et al. (2005) ont conclu que les bandes delta, theta, alpha et beta pouvaient fournir des informations sur le niveau de la charge cognitive imposée par différentes tâches d'un simulateur de pilotage. Les principales limites associées à cette méthode concernent l'appareillage nécessaire et le long temps de préparation des sujets. Bien que certains dispositifs permettent l'analyse en temps réel, celle-ci est fréquemment réalisée à postériori en raison de la complexité des traitements nécessaires pour l'interprétation des signaux. Malgré tout, l'EEG demeure une technique très intéressante et encore pleine de promesses.

1.1.3.2.3.2 Fréquence cardiaque, respiration, pression artérielle

Dans des situations complexes comme la conduite automobile urbaine à l'heure de pointe, l'effort cognitif doit augmenter pour maintenir un niveau de performance adéquat. Cet effort amène une diminution de l'activité du système parasympathique et une augmentation de l'activité du système sympathique (Mulder 1992). Ces changements peuvent être perçus par des réactions périphériques au niveau de la fréquence cardiaque, de la respiration et de la pression artérielle (Mulder 1992; Veltman and Gaillard 1996).

La fréquence cardiaque ainsi que la variabilité du rythme cardiaque sont souvent rapportées comme des mesures sensibles aux variations de la charge attentionnelle (Roscoe 1992; Roscoe 1993; Neumann 2002; Lee and Liu 2003). Précisément, une augmentation de la fréquence cardiaque est associée à une augmentation de la charge mentale (Roscoe 1978; Wilson 1993). L'un des avantages importants de la fréquence cardiaque est qu'elle peut être acquise en continu et fournir une valeur instantanée. Toutefois, il est bien connu que la

fréquence cardiaque varie pour une multitude de raisons incluant l'effort physique, le stress, le bruit et les stimulations visuelles (Carroll and Rhys-Davies 1979; Martin, Todd et al. 2005). Comme ces stimulations ne sont pas nécessairement associées à une augmentation de la charge attentionnelle et ne sont pas reliées directement à la tâche (Casali and Wierwille 1984), elles contaminent la fréquence cardiaque et nuisent à sa validité en tant qu'indicateur de la charge attentionnelle. La fréquence cardiaque pourrait être insuffisamment sensible dans des situations où le niveau de stress ne joue pas un rôle significatif dans l'augmentation de la charge mentale (Sekiguchi, Handa et al. 1978). Pour que la fréquence cardiaque soit une mesure valide de la charge attentionnelle, l'environnement doit être parfaitement contrôlé autrement, il y aura une diminution importante de la validité. De plus, la fréquence cardiaque de repos varie beaucoup d'un individu à l'autre. Il n'est donc pas étonnant que le calcul de la valeur moyenne d'un groupe de sujets ne reflète pas les variations attendues. Pour éviter que l'hétérogénéité interindividuelle de la fréquence de repos des individus ne masque les effets subséquents, Kroemer (1997) a suggéré d'utiliser la fréquence cardiaque résiduelle (fréquence cardiaque de travail – la fréquence cardiaque de repos) pour mesurer la charge cognitive plutôt que la fréquence cardiaque de travail directement. Il s'agit probablement de l'une des raisons pouvant expliquer que certaines études n'ont démontré aucune sensibilité à déterminer la variation de la charge cognitive à l'aide de la fréquence cardiaque (Lee and Liu 2003) ou de la variabilité du rythme (Casali and Wierwille 1984). La fréquence cardiaque résiduelle s'est avérée un indice utile pour mesurer la charge cognitive à plusieurs reprises (Sekiguchi, Handa et al. 1978; Kroemer and Grandjean 1997; Lee and Liu 2003).

La variabilité du rythme cardiaque semble également sensible aux modifications de la charge mentale. Concrètement, la variabilité diminue avec une augmentation de la charge (Bucks and Seljos 1994; Neumann 2002; Lee and Liu 2003). Certains auteurs ont toutefois observé que la variabilité du rythme cardiaque n'était sensible qu'aux variations importantes de la charge cognitive (Jorna 1992; Veltman and Gaillard 1996; Veltman and Gaillard 1998). Il y a plusieurs méthodes pour calculer la variabilité du rythme cardiaque. L'une d'elles consiste à calculer la valeur RMS de la différence temporelle entre deux pics subséquents de l'onde R (électrocardiographie) et la valeur moyenne. L'analyse fréquentielle du signal ECG a également été utilisée comme méthode pour calculer la

variabilité du rythme. Pour ce faire, le spectre de fréquence de l'électrocardiogramme est divisé en trois bandes distinctes : basse (0.02-0.06 Hz), moyenne (0.07-0.14) et haute (0.15-0.50) (Mulder 1992). La bande basse est partiellement causée par la régulation de la température corporelle, la bande moyenne par la régulation à court terme de la pression artérielle et la bande haute par l'activité de la respiration qui a normalement une fréquence de 0.3 Hz. Les deux branches du système nerveux autonome n'ont pas la même influence sur le spectre de fréquence de l'ECG. Les changements au niveau de la branche sympathique comme ceux survenant à l'exercice physique réagissent tranquillement et se reflètent uniquement au niveau de la bande basse et de la bande moyenne. Les changements au niveau de la branche parasympathique se reflètent au niveau des trois bandes. La bande basse est reconnue comme étant la moins valide étant la plus affectée par la durée d'acquisition. La bande haute est affectée par le rythme de la respiration et à moins de mesurer ce rythme, il est ardu, voire même impossible, d'interpréter la bande haute du signal ECG. Le changement du rythme cardiaque associé à la respiration est appelé arythmie sinusale respiratoire (ASR) et il reflèterait l'activité du système parasympathique (Veltman and Gaillard 1996). L'effort mental semble avoir la plus grande influence sur la bande moyenne (Aasman, Mulder et al. 1987). Celle-ci est donc privilégiée pour l'étude de la charge cognitive (Jorna 1992). À priori, le lien entre la charge cognitive et la bande moyenne du signal ECG n'est pas évident. L'activité de la bande moyenne est liée à la pression artérielle qui est régulée par différents mécanismes agissants à court ou à long terme. Un changement de la pression artérielle est compensé par un changement équivalent, mais de sens opposé de la fréquence cardiaque qui permet de stabiliser la pression artérielle. L'effort mental diminue la sensibilité de ce mécanisme de régulation de la pression artérielle ce qui a pour effet que la relation entre la pression artérielle et la fréquence cardiaque est plus faible et que la variabilité de la fréquence cardiaque est moins affectée par la pression artérielle. Ainsi, la variabilité de la fréquence cardiaque diminue au fur et à mesure que la charge cognitive augmente (Veltman and Gaillard 1998).

La bande moyenne est également affectée par la respiration, mais d'une manière moins importante que la bande haute (Veltman and Gaillard 1996). Globalement, plusieurs facteurs peuvent influencer le spectre de fréquence de l'ECG et modifier la variabilité du rythme cardiaque. Les plus importants sont la respiration incluant les facteurs qui peuvent

l'influencer (parole, toux, manœuvre de vasalva, etc.), l'activité musculaire, la position du corps et l'âge (Jorna 1992).

La pression artérielle a également été utilisée pour quantifier la charge mentale (Wierwille 1979; Veltman and Gaillard 1996). Plusieurs types de tensiomètres sont disponibles. Les plus traditionnels se portent sur le bras, mais certains se portent au niveau du poignet ou même d'un doigt. Le risque d'interférence physique avec la tâche primaire dicte généralement le type de tensiomètre à utiliser. Dans tous les cas, ils enregistrent la pression systolique et diastolique. Dans une étude de Veltman (1998), la pression artérielle a été sensible aux variations importantes de la charge entre 2 contextes bien différents. Par contre, aucune différence significative n'a été obtenue pour différentes variantes (différents niveaux de charge cognitive) d'un même contexte. Les auteurs expliquent leur résultat par le fait que la pression artérielle est sensible aux activités du système nerveux sympathique uniquement. Dans une autre étude de Veltman (1996), la pression systolique et diastolique a été sensible aux différents niveaux de la charge. Curieusement, même si la différence absolue au niveau de la pression artérielle systolique était plus importante, les résultats de la pression diastolique étaient plus stables. La variabilité de la pression a également été calculée à partir du spectre de fréquence, mais aucune différence significative n'a été observée.

Tout comme la fréquence cardiaque et la pression artérielle, plusieurs auteurs (Casali and Wierwille 1984) ont utilisé la fréquence respiratoire pour tenter de mesurer la charge attentionnelle. La méthode la moins intrusive et la plus fréquemment utilisée consiste à mesurer l'extension du thorax et de l'abdomen à l'aide de deux bandes élastiques (Veltman and Gaillard 1996). Les principales variables observées pour mesurer la charge mentale sont le spectre de fréquence, le volume respiratoire et la fréquence. Dans certains cas, la fréquence a démontré une excellente sensibilité pour déterminer les variations de la charge pour une tâche simple (Casali and Wierwille 1984; Wientjes 1992). Veltman a également observé des différences au niveau de la respiration. Suite à l'atterrissage d'un avion, le pilote respirait plus profondément et lentement. Par contre, aucune différence n'a été observée lors des autres contextes de pilotage incluant le décollage et l'atterrissage. Il faut toutefois mentionner que la respiration est généralement enregistrée pour aider à

l'interprétation du spectre de fréquence du rythme cardiaque et non pour mesurer la charge attentionnelle directement.

1.1.3.3 Attention visuelle et système préattentionnel

L'attention visuelle est la capacité du système visuel à sélectionner rapidement les informations visuelles les plus pertinentes dans l'environnement. Puisque le traitement de toutes les informations disponibles au même instant et en haute définition est impossible, la région périphérique à la fovéa est traitée à basse résolution par le système préattentionnel et la haute résolution est réservée pour le traitement de l'information se trouvant sur la fovéa ou légèrement en périphérie (Julesz and Schumer 1981). Ainsi, une perte importante de l'acuité visuelle survient dès qu'on s'éloigne de la fovéa. Toutefois, cette réduction importante de l'information disponible ne règle pas complètement la problématique de la quantité importante d'information à analyser et des mécanismes attentionnels doivent être mis en place pour traiter sommairement l'ensemble de la scène et sélectionner les régions qui nécessitant une analyse plus approfondie. Plusieurs facteurs semblent influencer l'attention visuelle. Par exemple, le fait de porter son attention sur un stimulus attendu permet d'améliorer le temps de réaction lorsque ce stimulus se présente. L'attention visuelle peut également être restreinte à une section précise du champ visuel (Moran and Desimone 1985), à un objet (Goldsmith and Yeari 2003) ou encore à une fenêtre temporelle (Chun 2000). Toutes ces caractéristiques de l'attention visuelle permettent d'améliorer significativement le temps de réponse au stimulus.

Le système préattentionnel implique le traitement efficace et rapide de l'information d'une scène visuelle pour que l'attention puisse être dirigée sur les aspects significatifs et importants de cette scène. Ce stade rapide de traitement de l'information est limité à certaines caractéristiques visuelles de base comme la couleur, la grosseur, l'orientation, le mouvement et la profondeur stéréoscopique. Ces caractéristiques ont la capacité d'attirer et de diriger l'attention (Julesz and Schumer 1981). D'autres paramètres comme la forme, la courbure ou le clignotement lumineux semblent également attirer l'attention par l'intermédiaire du système préattentionnel, mais les évidences scientifiques sont moins nombreuses à ce propos (Wolfe and Horowitz 2004).

1.1.4 Vieillesse

Le vieillissement est une expérience que tous les êtres vivants partagent, mais que personne n'arrive à comprendre parfaitement. La compréhension intégrale des processus causant le vieillissement permettrait de le retarder et pourquoi pas de l'arrêter. Le désir de comprendre le vieillissement et d'en connaître les causes n'est pas un phénomène récent. Il semble qu'Hippocrate (460-377 av. J.-C.) fut le premier à proposer une théorie sur le vieillissement suivi par de nombreux autres scientifiques et philosophes tel que Gallen (130-201), Bacon (1210-1292), Darwin (1731-1802) etc. Ce n'est qu'au milieu du 19^{ème} siècle que la médecine humaine fut suffisamment documentée pour conclure que les cellules mouraient avec le temps et que celles-ci n'étaient pas remplacées (Spiriduso, Francis et al. 2005). Les connaissances actuelles indiquent qu'il est impossible d'arrêter le vieillissement et même d'allonger le potentiel maximum de vie d'un humain. Il est toutefois possible d'allonger l'âge moyen de vie d'une population donnée. Pour ce faire, il faudrait diminuer l'incidence des maladies chroniques et des accidents et qu'un maximum de gens adopte un style de vie sain. Malheureusement et bien qu'une multitude de produits prétendent ralentir le vieillissement, très peu de recherches scientifiques supportent ces conclusions (Olshansky, Hayflick et al. 2002). Pour l'instant, seule l'adoption de bonnes habitudes de vie comme l'exercice et une alimentation saine semble permettre de ralentir le vieillissement (Goodrick 1980; Holloszy 1993; Sarna, Sahi et al. 1993).

Un facteur important à considérer lors de l'étude des personnes âgées est qu'il s'agit d'une population hétérogène où les différences interindividuelles sont omniprésentes. Chaque individu vieillit et subit le vieillissement d'une façon différente. Il n'est pas rare de voir des personnes âgées accomplir des exploits sportifs hors du commun alors que d'autres sont confinés à un fauteuil roulant ou à se déplacer avec une aide ambulatoire. Il semble que le mieux qu'il est possible de faire actuellement est de tenter de comprendre les différents aspects du vieillissement pour faciliter cette étape de la vie. Au Canada, tout comme dans l'ensemble des pays industrialisés, le vieillissement de la génération des "baby-boomers" et l'espérance de vie accrue entraîneront des changements démographiques importants. Le 1^{er} juillet 2006, l'âge médian de la population a atteint un niveau sans précédent de 38.8 ans comparativement à 37.2 ans en 2001. Ce record devrait d'ailleurs être battu tous les ans d'ici 2056 où Statistique Canada (2005) prévoit qu'il se situera à 46.9 ans. Les projections

d'accroissement moyen de la population prévoient que les personnes âgées de plus de 65 ans pourraient passer de plus de 4.3 millions en 2006 à plus de 9.1 millions 25 ans plus tard (Statistiques Canada 2006). Toujours selon ces estimations, les personnes âgées représenteront 23.4% de la population en l'an 2031 comparativement à seulement 13.2 % en 2006.

Il ne fait aucun doute que le vieillissement amène des modifications importantes du comportement moteur et une dégénérescence sensorielle. Ces modifications affectent autant le système cognitif que le système moteur et le système sensoriel. Même les personnes âgées faisant de l'exercice physique régulièrement et n'ayant aucune pathologie connaissent un déclin de leurs capacités et de l'un ou plusieurs des systèmes impliqués dans le contrôle moteur. Le déclin des différents systèmes ne produit pas toujours une baisse observable de la performance des personnes âgées, mais celle-ci est inévitable et sera observable et quantifiable un jour ou l'autre. Globalement, il semble que le vieillissement réduit l'habileté des personnes âgées à percevoir rapidement et précisément la position du corps dans l'espace ce qui compromet leur performance dans une multitude de tâches complexes qui requièrent de la vitesse, de la précision, de la coordination, de la force et de l'équilibre. Ces changements semblent également affecter la capacité des personnes âgées à s'adapter rapidement à des situations changeantes (Spirduso, Francis et al. 2005).

Le système sensoriel est affecté par le vieillissement. Parmi les déficits sensoriels possibles, ceux qui affectent la vue et la vision sont observés et dépistés le plus fréquemment. La vue et la vision sont très souvent utilisées, à tort, comme des synonymes. La vue est un sens par lequel les stimulations lumineuses transitent de l'œil au cerveau tandis que la vision est un phénomène plus complexe qui fait intervenir l'œil comme organe récepteur des stimulations lumineuses, mais aussi des processus cognitifs mis en œuvre par des zones précises du cerveau. L'étude de ces deux qualités nécessite des outils différents. Il est bien établi que le cristallin jaunit et s'opacifie, que le diamètre de la pupille diminue et que l'intégrité de la macula et des voies nerveuses sont altérées avec le vieillissement. Ces altérations amènent une diminution de l'acuité visuelle, de la sensibilité aux contrastes, de la perception de la profondeur, de l'illumination de la rétine et de l'accommodation du cristallin (Decina and Staplin 1993). De plus, la sensibilité aux réflexions est augmentée alors que le champ

visuel est diminué (Johnson and Keltner 1983; Fozard and Gordon-Salant 2001). La prévalence des maladies oculaires comme les cataractes, la dégénérescence de la macula et l'apparition de glaucomes augmentent également avec l'âge et représentent la cause principale d'affaiblissement de la vue chez les personnes âgées (Cooper 1990). Dans l'ensemble, il est possible d'affirmer que la majorité des qualités visuelles diminuent à partir de 50 ans (Johnson and Choy 1987).

Les personnes âgées rapportent régulièrement des difficultés à réaliser les activités nécessitant des habiletés de recherche visuelle. Par exemple, Kosnik (1988) a observé que les situations où des objets ou événements distrayants étaient présents, où les scènes de fond étaient encombrées et où des stimuli étaient présentés pour de très courtes durées étaient particulièrement problématiques à réaliser pour les personnes âgées. Toutefois, bien que celles-ci soient généralement plus lentes que les jeunes adultes à réaliser une tâche de détection de cible, il semble que cet effet ne soit pas exacerbé par le nombre d'objets distrayants. L'habileté à détecter un objet lors d'une recherche où les cibles diffèrent grandement les unes des autres semble être une habileté invariante en fonction de l'âge. En effet, plusieurs expérimentations ont évalué la capacité des participants à déterminer de la présence ou de l'absence d'un objet parmi plusieurs autres alors que cet objet différait des autres par une seule caractéristique comme la couleur ou la grosseur. Peu importe le groupe d'âge, la pente de la fonction reliant le temps de réaction à la grosseur de la cible s'est avérée pratiquement égale à zéro (Scialfa, Esau et al. 1998; Burton-Danner, Owsley et al. 2001). Le déplacement de la cible jusqu'à 60° en périphérie n'a fait ressortir aucune différence entre les personnes âgées et les plus jeunes (Burton-Danner, Owsley et al. 2001). Dans des circonstances plus typiques de recherche d'informations, le mandat du système préattentionnel n'est pas uniquement de détecter une région d'intérêt comme dans les expérimentations ci-dessus mais également de guider l'attention sur la position spatiale de cette région du champ visuel et d'y déployer les ressources attentionnelles nécessaires (Owsley, Burton-Danner et al. 2000). Owsley et al. (2000) ont évalué la capacité des personnes âgées à guider l'attention sur les régions d'intérêt. Même si la tâche était relativement simple, les personnes âgées ont commis plus d'erreurs à localiser la cible et ces erreurs étaient plus importantes que pour les jeunes adultes. L'amplitude des erreurs commises s'est avérée particulièrement importante en périphérie du champ visuel. Ce

résultat confirme ceux de Sekuler et al. (1986) et de Ball et al. (1988) qui avaient noté une augmentation des erreurs lors d'une tâche de détection de cibles lorsque celles-ci étaient situées en périphérie et que la tâche de détection était effectuée simultanément à une tâche attentionnelle. Tous les déficits étaient indépendants du nombre d'éléments distrayants ce qui implique que cette tâche est réalisée par le système préattentionnel. Ainsi, il semble que même si les personnes âgées peuvent efficacement rechercher parallèlement une cible dans une scène visuelle sur la base d'une caractéristique simple, leur capacité à la localiser spatialement, a posteriori, est défaillante.

La perception du corps dans l'espace est possible grâce aux systèmes somatosensoriel et vestibulaire. Les récepteurs cutanés, musculaires, tendineux, articulaires et vestibulaires informent les centres nerveux supérieurs sur la position et les déplacements du corps et des segments (Rigal 1995). Les fuseaux neuromusculaires (muscle) informent le système nerveux de la longueur du muscle, de la vitesse de changement d'état et de la position du segment grâce aux fibres nerveuses Ia et II. Les organes tendineux de Golgi (tendon) codent la tension et la raideur musculaire par l'intermédiaire des fibres Ib. Les récepteurs articulaires renseignent sur la position, la direction et la vitesse angulaire aux extrémités de l'amplitude de mouvement des articulations grâce aux organes de Golgi, aux récepteurs de Ruffini et aux capsules de Pacini. Les récepteurs cutanés réagissent au toucher, à la pression et aux vibrations. Il en existe quatre types dont deux à adaptation rapide (Meissner et Pacini) et deux à adaptation lente (Merkel et Ruffini). Finalement, les récepteurs vestibulaires se situent dans l'oreille interne et sont composés de l'utricule, du saccule et des canaux semi-circulaires (système vestibulaire périphérique). Ils transmettent aux centres nerveux supérieurs des informations sur les accélérations angulaires (canaux semi-circulaires) et linéaires de la tête (otolithes). Avec l'avancement en âge, la sensibilité des récepteurs cutanés au touché et à la pression (Thornbury and Mistretta 1981; Kenshalo 1986; Stevens 1992) diminue tout comme le nombre de voies sensorielles innervant ces récepteurs (Bruce 1980). Le seuil de détection des vibrations cutanées diminue de 2 à 10 fois avec le vieillissement (Perret and Regli 1970). Plusieurs études ont également montré une détérioration de la proprioception avec l'âge (Skinner, Barrack et al. 1984; Petrella, Lattanzio et al. 1997). Tous ces facteurs contribuent à une moins bonne connaissance de la position des segments corporels dans l'espace et tout particulièrement quand le corps est en

mouvement. Dans certains cas, une perte partielle ou complète de sensation périphérique peut survenir. Cette condition se nomme neuropathie périphérique. Toutefois, dans la majorité des cas, les conséquences que ces changements peuvent avoir sur le contrôle du mouvement et particulièrement sur les tâches nécessitant le déploiement d'une certaine force (saisie d'objets, activation d'une pédale, etc.) sont mal connues et difficilement observables. Les erreurs d'activation des pédales menant à des accélérations soudaines des véhicules pourraient en être une manifestation importante, mais cette hypothèse est peu documentée. Il semble que la majorité des personnes âgées ne souffrent pas d'une déficience tactile suffisante pour que cela nuise ou modifie leur dextérité manuelle (Cole, Rotella et al. 1998). Les personnes âgées avec un déficit important du système somatosensoriel montrent souvent une réponse motrice retardée et une incapacité à jauger efficacement l'amplitude de la réponse motrice nécessaire à la suite d'une stimulation sensorielle. Ainsi, une personne âgée avec un déficit important du système somatosensoriel devra s'appuyer, en grande partie, sur les deux autres systèmes pour optimiser sa performance. Par exemple, il est admis dans la littérature que la vision permet aux personnes souffrant d'une dégénérescence tactile importante d'effectuer des tâches de saisie sécuritaire (Brink and Mackel 1987). De nombreuses études ont montré que les fonctions vestibulaires se détérioraient également avec l'âge (Matheson, Darlington et al. 1999; Baloh, Enrietto et al. 2001). Rosenhall et Rubin (1975) ont même estimé qu'à l'âge de 70 ans, la quantité de cils des cellules cillées vestibulaires pouvait avoir diminué de 40 %. Une diminution du nombre de neurones a également été observée au niveau des ganglions vestibulaires et des noyaux vestibulaires médians et supérieurs (Lopez, Honrubia et al. 1997; Park, Tang et al. 2001). Finalement, une réduction modérée du gain du réflexe vestibulo-oculaire a été observée avec le vieillissement. Puisque ce réflexe est responsable de la stabilisation de la vision lors de mouvement de tête rapide, une réduction du gain pourrait potentiellement affecter les stratégies oculaires de recherche d'informations utilisées par les personnes âgées.

Le vieillissement affecte plusieurs aspects des mouvements volontaires et involontaires. Ces changements diminuent la performance des personnes âgées dans une multitude de tâches fonctionnelles comme la locomotion, la posture et la conduite. Ces modifications sont attribuées à deux causes principales. La première cause concerne la dégénérescence du

système périphérique alors que la deuxième cause vise les altérations du système nerveux central. Au niveau du système périphérique, les changements survenant au niveau du muscle sont les plus importants. La diminution de la masse musculaire également appelée sarcopénie amène une diminution de la force musculaire (Winogard, Hicks et al. 1997). Cette diminution de la force semble débiter entre 50 et 60 ans et elle survient en raison d'une diminution de l'aire de section physiologique et du nombre de fibres musculaires (Bemben 1998; Kirkendall and Garrett 1998). En plus de la force, la puissance et l'endurance musculaire diminuent également avec le vieillissement. La perte de puissance est importante puisqu'elle est probablement responsable en grande partie de la diminution de la performance des personnes âgées lors de tâches fonctionnelles comme la marche, la montée ou descente d'un escalier, le soulèvement d'une chaise, etc. (Spirduso, Francis et al. 2005). L'endurance musculaire est également importante puisqu'elle est directement liée à la fatigabilité. Zimmerman et al. (1993) ont également observé que le tissu conjonctif remplaçait les unités contractiles du muscle avec le vieillissement. Cette dernière observation explique en grande partie la rigidité musculaire observée chez les individus âgés (McDonagh, White et al. 1984). Les changements survenant au niveau du système nerveux sont également très importants. Le nombre de neurones corticaux dont les axones forment la voie corticospinale et le nombre de motoneurones α diminuent avec l'âge (Roos, Rice et al. 1997). La mort des motoneurones α a pour conséquence de dénervier des groupes de fibres musculaires. Cette dénervation est suivie par une réinnervation des fibres par les axones restant. Cette réinnervation produit une augmentation du nombre de fibres musculaires par unité motrice, une diminution du nombre total d'unités motrice et une diminution du nombre d'unités motrices rapides. Ces changements modifient la relation entre la grosseur des unités motrices, la fatigabilité et la séquence de recrutement des unités motrices (Latash 2008). Éventuellement, les petites unités motrices disparaissent et les personnes âgées montrent une perte de contrôle au niveau du maintien de la force, une augmentation de la variabilité, une perte de fluidité des mouvements etc (Laidlaw, Bilodeau et al. 2000). La perte d'unités motrices rapides diminuent également l'habileté des personnes âgées à effectuer des mouvements rapides (Erim, Beg et al. 1999). Lors de mouvements volontaires rapides, le patron triphasique d'activation musculaire des paires de muscles agonistes et antagoniste des personnes âgées est similaire à celui d'individus plus

jeunes, mais montre tout de même une légère augmentation de la coactivation musculaire (Buchman, Leurgans et al. 2000; Klein, Rice et al. 2001). Une augmentation de la coactivation musculaire a également été observée pour une multitude d'autres tâches (Spiegel, Stratton et al. 1996; Tang, Woollacott et al. 1998). Les personnes âgées montrent également des patrons d'activation musculaire beaucoup plus variables et une habileté réduite à inhiber une réponse motrice inappropriée suite à une perturbation (Stelmach, Teasdale et al. 1989).

La caractéristique la plus marquante du vieillissement est possiblement le ralentissement général et particulièrement physique qu'il provoque. Même si le vieillissement est sournois et affecte les individus d'une manière bien différente les uns des autres, l'initiation et l'exécution des mouvements sont graduellement, mais inexorablement ralenties. Le temps de réaction qui correspond à l'intervalle de temps entre un stimulus et l'initiation d'une réponse motrice volontaire et qui est sans contredit l'une des variables ayant le plus été étudiée en relation avec le vieillissement n'y échappe pas. Ainsi, le vieillissement amène une augmentation importante du temps de réaction simple (Welford, Norris et al. 1969; Salthouse 1979; Stelmach, Goggin et al. 1988; Fozard, Vercryssen et al. 1994). Même si cette valeur peut être modifiée par la modalité du stimulus (visuel, auditif, tactile, etc.), l'augmentation du temps de réaction simple associé au vieillissement est généralement de l'ordre de 25% (Amrhein, Stelmach et al. 1991). Fozard (1994) a estimé que le temps de réaction simple augmentait de 0.5 ms par année entre 20 et 96 ans. Il semble toutefois que cette différence soit moins importante lorsque les facteurs expérimentaux tels que la nouveauté, la pratique, la qualité du stimulus et les attentes vis-à-vis la performance sont maintenus et contrôlés. L'ajout d'une prise de décision précédant la réaction accentue toutefois les différences entre les personnes âgées et les individus plus jeunes. Cette fois-ci, Fozard (1994) a estimé que le temps de réaction à choix augmentait de 1.6 ms par année entre 20 et 96 ans. Finalement, il semble que le temps de réaction des personnes âgées augmente disproportionnellement par rapport aux individus plus jeunes avec une augmentation du nombre et du type de stimuli, du nombre de modalités de réponse et de la complexité de la réponse à produire (Hale, Myerson et al. 1987; Hultsch, MacDonald et al. 2002). Ces résultats suggèrent que le vieillissement a un impact plus important sur la

composante de traitement de l'information que sur les composantes perceptuelle et motrice (Spirduso, Francis et al. 2005).

Le temps de mouvement qui est l'intervalle de temps entre l'initiation de la réponse et la fin de celle-ci est également une variable qui a été étudiée à de nombreuses reprises (Welford, Norris et al. 1969; Salthouse 1979; Stelmach, Goggin et al. 1988). Les résultats de ces études ont permis de confirmer la croyance populaire qui veut que les personnes âgées bougent moins rapidement. Plusieurs hypothèses ont été suggérées pour expliquer ce ralentissement du temps de mouvement. Goggin et Meeuwsen (1992) en ont présenté trois. Premièrement, ils ont proposé que le ralentissement soit une stratégie cognitive des personnes âgées pour maintenir un niveau élevé de précision des mouvements. Salthouse (1979) et Welford (1969) après avoir utilisé le paradigme vitesse-précision de Fitts (1954) avaient suggéré une hypothèse similaire voulant que les personnes âgées soient plus attentionnées que les jeunes ce qui les amènerait à privilégier la précision au détriment de la vitesse. Deuxièmement, des déficits neurophysiologiques affecteraient le contrôle du mouvement chez les gens âgés. Finalement, une diminution de la vitesse de contraction musculaire ainsi qu'une diminution du signal neural affecteraient l'habileté des personnes âgées à évaluer la vitesse et l'accélération de la contraction musculaire. Pour en connaître plus à ce propos, certaines études ont aussi analysé les caractéristiques cinématiques du mouvement. Cooke et al. (1989) ont remarqué dans une tâche de pointage des patrons de vitesse asymétriques et une phase de décélération plus longue pour les personnes âgées. Ils ont aussi constaté que les personnes âgées étaient beaucoup plus variables dans la phase de décélération du mouvement. Ils ont expliqué leurs résultats en suggérant que les trajectoires des mouvements des personnes âgées étaient moins précisément contrôlées par celles-ci et ont conclu que les personnes âgées utilisaient des stratégies de contrôle différentes des jeunes adultes. Crossman et Goodeve (1983) ont également observé l'existence de ces deux phases lors de l'exécution de mouvements de pointage. La première phase étant, selon eux, préprogrammée (circuit ouvert) alors que la deuxième phase incluait des mouvements de correction (circuit fermé). Yan et al. (1998) ont également évalué la cinématique d'un mouvement de pointage rapide chez les personnes âgées. Suite à une analyse de leurs résultats, ils ont conclu que puisque les personnes âgées étaient plus variables et plus lentes dans l'exécution du mouvement, la programmation de la tâche était défailante. Leur

analyse s'appuie sur la théorie du schéma proposé par Schmidt (1975). Cette défaillance semble confirmée par l'augmentation du temps de réaction général observé avec le vieillissement (Welford, Norris et al. 1969; Salthouse 1979; Stelmach, Goggin et al. 1988; Fozard, Vercryssen et al. 1994).

1.1.5 Vieillesse et conduite automobile

Avec les changements démographiques importants, le questionnement à propos du permis de conduire chez les personnes âgées est très actuel. Aux États-Unis, la quantité de personnes âgées à détenir un permis valide a augmenté de près de 40 % entre 1989 et 1999. En 1989, 8 % des permis de conduire étaient délivrés à des personnes âgées alors que dix ans plus tard, ce pourcentage se situait à 10 % (National Highway Traffic Safety Administration 1999). Au Québec, le démographe Robert Bourbeau (1997) estime que cette proportion se situera à 16 % en 2016. Nicoletta de Statistique Canada (2000) a analysé les données sur les habitudes de conduite et la fréquence des accidents des Canadiens pour l'année 1999. Il a observé que le groupe des 55 ans et plus représentait 27% de la population totale et 24 % des titulaires de permis de conduire. De plus, ce groupe d'âge a parcouru environ 23% du total des kilomètres. Pour l'ensemble des groupes d'âges, les hommes constituaient la plus forte proportion de conducteurs mais cette tendance était beaucoup plus marquée chez les plus de 55 ans où les hommes formaient 55 % des titulaires de permis, mais seulement 45 % de l'ensemble du groupe. Ces résultats sont en harmonie avec ceux provenant d'une enquête nationale réalisée en 1996-1997 par Statistique Canada (1999). Toutefois, celle-ci montrait également une augmentation de ces pourcentages pour les conducteurs provenant des régions rurales où 77 % des hommes mariés de 65 ans et plus avaient conduit le véhicule familial dans les 30 jours précédant l'enquête contre seulement 36 % des femmes mariées. Contrairement à la courbe habituelle en forme de U (âge des conducteurs vs nombre d'accidents par année) qui montre une augmentation du nombre d'accidents pour les jeunes conducteurs et les personnes âgées, les conducteurs âgés inclus dans l'enquête nationale ont parcouru 23 % du total des kilomètres mais ils ont été impliqués dans moins de 20 % des collisions entraînant au moins un blessé. La différence avec les données habituellement rapportées provient probablement du fait que l'augmentation de la fréquence des accidents chez les personnes âgées survient généralement autour de 85 ans (Li, Braver et al. 2003) alors que la tranche d'âge employée

dans l'enquête nationale concernait les 55 ans et plus. La majorité des accidents du groupe des 55 ans et plus sont survenus vers la fin de la semaine (jeudi et vendredi) entre 15 h et 18 h. Ces deux tendances sont conformes à l'ensemble de la population. Cette enquête a également montré que les 55 ans et plus parcouraient la majorité de leurs kilomètres entre 12 h et 15 h et qu'ils conduisaient davantage pour faire des achats (plus de 25 % de la distance totale parcourue). Les moins de 55 ans conduisent pour diverses raisons incluant le magasinage et le travail dans une proportion similaire. L'enquête nationale de 1996 a également montré que les Canadiens âgés de 65 ans et plus provenant des régions (60 %) étaient plus susceptibles de conduire un véhicule que ceux qui habitaient les grands centres urbains (40 %). Ceci est peu surprenant puisque l'accessibilité aux services de base et les services de transport en commun se font beaucoup plus rares en régions rurales. Pour garder une certaine autonomie, les personnes âgées n'ont d'autres choix que d'utiliser leur véhicule. De plus, la perception du risque associée à la conduite en région rurale est possiblement moins importante que celle associée à la conduite en milieu urbain. Finalement, la majeure partie des déplacements effectués par les aînés interrogés dans le cadre de l'enquête étaient relativement courts pour un total de 11 à 17 km par jour.

L'un des problèmes associés au vieillissement est que ses manifestations surviennent graduellement. Ces changements progressifs font que la majorité des conducteurs âgés ne sont pas en mesure de détecter une diminution de leur performance et l'augmentation du risque qui y est associée avant qu'un incident se produise ou qu'ils reçoivent un avertissement (Wood 1999). Les problèmes de santé sont également plus présents. Chez les plus de 75 ans, l'enquête nationale de 1996 a montré que 35 % des hommes et 56 % des femmes souffraient d'arthrite et de rhumatisme chronique. Selon la localisation de ces atteintes, certaines manœuvres de conduite comme de regarder l'angle mort ou les rétroviseurs peuvent être affectées ou même omises. De plus, l'enquête nationale de 1996 a montré que 48 % des conducteurs et 54 % des conductrices de 75 ans et plus consommaient trois médicaments ou plus quotidiennement. Del Rio et Alvarez (2003) avaient observé qu'environ 55 % des personnes âgées de plus de 65 ans consommaient régulièrement 1 médicament et que la moyenne était de 1.42. Sachant que l'usage de certaines familles de médicaments peut créer les mêmes effets que l'alcool et diminuer considérablement la performance de conduite, cette problématique est de première importance en matière de

sécurité routière (Del Rio and Alvarez 2003). Contrairement à l'alcool, l'établissement de normes concernant la dose limite acceptable pouvant être consommée avant la conduite d'une automobile est beaucoup plus complexe. Premièrement, il y a de nombreuses familles de médicaments ce qui nécessiterait une multitude d'études et le développement de tests utilisables pour les policiers. De plus, les interactions entre les différents médicaments incluant l'alcool et les drogues illicites sont très peu documentées complexifiant la problématique. Devant l'ampleur du travail à réaliser, certains pays comme la Belgique, l'Allemagne et la Suède ont adopté une politique de tolérance zéro plutôt qu'une approche plus complexe évaluant la capacité physique et cognitive du conducteur (Del Rio and Alvarez 2003).

1.1.6 Vieillesse, conduite et modification du risque :

Une littérature exhaustive indique que les personnes âgées sont impliquées plus fréquemment dans des accidents de la route par kilomètre conduit (Levy, Vernick et al. 1995; Dulisse 1997; U.S. Department of Transportation 1997; Ryan, Legge et al. 1998; Hakamies-Blomqvist and Peters 2000; Evans 2004) et que lorsqu'elles sont impliquées dans un accident, elles sont plus susceptibles de souffrir d'une blessure sérieuse ou même de décéder (Cerrelli 1992; Li, Braver et al. 2003). Récemment, une nouvelle perspective concernant la problématique des conducteurs âgés a vu le jour. Alors que tout le monde avait acquis la conviction que les personnes âgées étaient des conducteurs plus à risque par kilomètre conduit, des études récentes suggèrent que cette certitude a été acquise en raison de biais expérimentaux. Le premier biais a été proposé pour la première fois par Janke (1991) et a été repris à plusieurs reprises par la suite (Li, Braver et al. 2003; Langford, Methorst et al. 2006). Toutes ces études ont montré qu'une proportion importante des décès par kilomètre conduit chez les conducteurs âgés était en fait due à une augmentation de la fragilité des individus de plus de 60 ans (Kim, Nitz et al. 1995; Wang 2001) et non pas uniquement à une augmentation de la fréquence des accidents. Le deuxième biais expérimental est tout aussi important et a été présenté par Hakamies-Blomqvist et son équipe (2002) et repris par Langford et al. (2006). Ce biais a reçu l'appellation de « Low Mileage Bias » et signifie que la relation entre la fréquence des accidents et la distance parcourue n'est pas linéaire contrairement à ce qui était présumé. Ainsi, les conducteurs qui parcourent plus de kilomètres annuellement ont une fréquence d'accident par kilomètre

moins élevée que ceux qui en parcourent moins (figure 1). De plus, cette relation semble indépendante de l'âge (figure 2). Puisque les conducteurs âgés parcourent généralement moins de kilomètres annuellement, ils ont une fréquence d'accident, par unité de distance, plus élevée que le reste de la population qui parcourt plus de kilomètres. L'étude de Langford et al. (2006) a été réalisée par sondage et incluait plus de 47 500 répondants depuis 1990. Globalement, Langford et al. (2006) ont révélé que les personnes âgées étaient moins souvent impliquées dans un accident de la route que les autres groupes d'âge. Le groupe des 75 ans et plus conduisant moins de 3000 km annuellement a toutefois montré un taux plus élevé d'accident. En raison du nombre peu élevé de conducteurs âgés de plus de 75 ans dans l'étude et de la variabilité importante au niveau des résultats, considérée comme telle. Il faut mentionner qu'en raison de la grande hétérogénéité de la population chez les 75 ans et plus, la grande variabilité des résultats peut très bien avoir été causée par des données s'écartant anormalement de la moyenne ("outliers") et ne reflétant pas nécessairement l'ensemble du groupe. Une autre explication pourrait venir de la tendance des personnes âgées à autoréguler leur conduite plus que tous les autres groupes de conducteurs en réponse à l'auto perception d'un déclin de leurs habiletés de conduite. Toutefois, cette deuxième explication est improbable puisque plusieurs auteurs ont montré que les personnes âgées avaient tendance à surestimer leurs habiletés de conduite et à dénier le déclin de leurs habiletés (Holland 1993; Marottoli, Cooney et al. 1997; Tuokko, McGee et al. 2007; Windsor, Anstey et al. 2008). Finalement, une dernière explication de ces résultats pourrait être que les personnes âgées qui conduisent moins de 3000 km conduisent plus souvent sur des routes locales avec peu d'intersections et de situations conflictuelles. La principale limite de cette étude est que les données concernant la fréquence des accidents et le kilométrage parcouru ont été recueillies par sondage. Même si ces données semblent en agrément avec les registres officiels, des divergences peuvent survenir pour certains sous-groupes de conducteurs (Marottoli, Cooney et al. 1997; McGwin, Owsley et al. 1998). Récemment, Staplin et al. (2008) ont mis en doute le « Low Mileage Bias » en argumentant que l'étude de Langford et al. (2006) avait été réalisée à partir de données auto rapportées par les sujets et que ce type d'informations pouvaient être sous-estimées pour certaines populations. Langford et al. (2008) sont revenus à la charge pour défendre le « Low Mileage Bias » en montrant que la sous-estimation des données

auto rapportées par rapport aux données fournies par l'odomètre était loin d'être clairement démontrée et que même dans le pire scénario, elle ne faisait que diminuer l'effet sans pour autant l'éliminer.

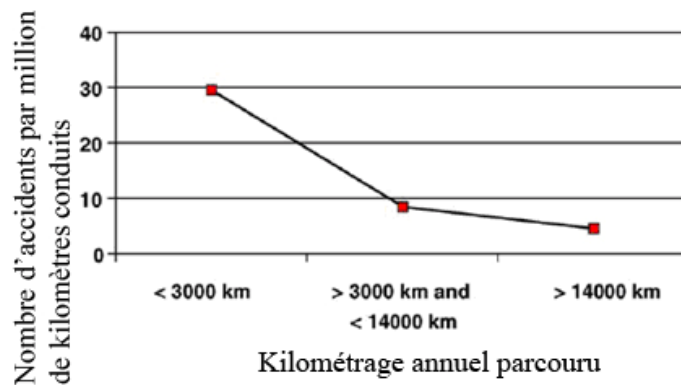


Figure 1 : Nombre d'accidents par kilomètre conduit en fonction du kilométrage annuel parcouru (traduite avec permission de Langford (2006)).

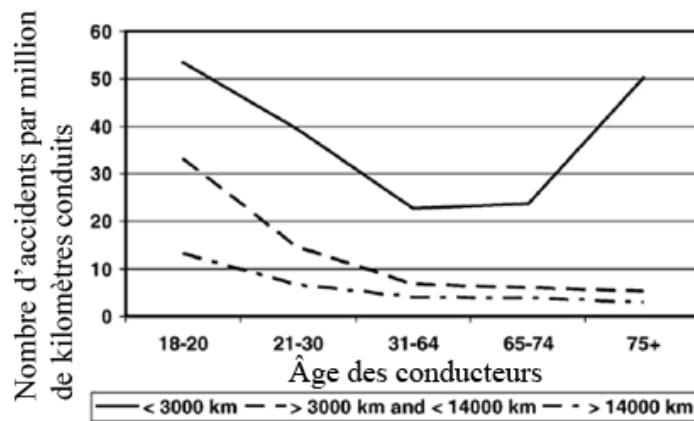


Figure 2 : Nombre d'accidents par kilomètre conduit en fonction de l'âge des conducteurs et du kilométrage annuel parcouru (traduite avec permission de Langford (2006)).

La majorité des accidents des conducteurs âgés surviennent le jour et succèdent à une violation du Code de la route. De ce fait, les personnes âgées sont souvent responsables des accidents et impliquent ainsi d'autres conducteurs qui ne se trouvaient qu'au mauvais endroit au mauvais moment (Hakamies-Blomqvist, Johansson et al. 1996). Il semble que certaines situations routières soient particulièrement à risque. Hakamies-Blomqvist (1993) a constaté une surreprésentation des personnes âgées dans les accidents survenant aux

intersections et dans des situations complexes de conduite (exemples : virage à gauche à une intersection, dépassement, insertion dans la circulation, etc.). Il n'est pas surprenant que le passage d'une intersection représente l'une des situations de conduite les plus difficiles pour les personnes âgées en raison de la quantité importante d'informations. La perception et le traitement rapide de ces informations améliorent la probabilité qu'une réponse motrice précise et appropriée soit fournie permettant la négociation sécuritaire de l'intersection. Dans une étude descriptive sur l'implication des conducteurs dans les accidents de la route, Cooper (1990) a utilisé une banque de données de 1986 pour répertorier la fréquence des accidents de policiers de différents groupes d'âge. La banque de données comprenait 2962 conducteurs dans le groupe d'âge 55-64 ans, 2018 dans le groupe des 65-74 ans, 873 dans le groupe des plus de 75 ans et 8210 dans le groupe contrôle comprenant des conducteurs de 36 à 50 ans. Il est intéressant de noter que 66.5 % des accidents du groupe de 36-50 ans sont survenus aux intersections comparativement à 69.2 %, 70.7 %, et 76.0 % pour les groupes de conducteurs âgés de 55-64, 65-74, et 75 et + respectivement. Un questionnaire postexpérimentation administré à un échantillon de conducteurs pour chacun des groupes a permis de constater que le passage d'une intersection était mentionné comme la deuxième plus difficile situation de conduite immédiatement après le changement de voie. Dans le même ordre d'idée, Hauer (1988) a étudié la fréquence des mortalités et des blessures. Il a rapporté que 37 % des mortalités et 60 % des blessures, survenant lors d'un accident de la route, chez les personnes âgées de 64 ans ou plus, se produisaient aux intersections. Pour les conducteurs de plus de 80 ans, c'est plus de 50 % des mortalités de la route qui surviennent aux intersections ce qui représente le double du groupe des 45-64 ans. Les résultats d'une étude d'Owsley et al. (1998) impliquant près de 300 conducteurs âgés suivis sur une période de trois ans ont engendré des résultats semblables. Soixante-dix pour cent des accidents et 37 % des décès sont survenus aux intersections. Tous ces résultats renforcent la croyance qui veut que les intersections soient problématiques pour tous les groupes d'âge et particulièrement pour les personnes âgées (Waller, E.G. et al. 1977).

Les conducteurs âgés montrent une variété de comportements à risque (Waller 1991). Wood et al. (1998) ont observé qu'ils étaient moins performants lors d'une tâche de détection de panneaux de circulation. La proportion importante de panneaux de circulation

non détectés a été particulièrement importante pour les personnes âgées saines alors qu'ils en ont manqué deux fois plus que le groupe de jeunes conducteurs. Ce résultat est encore plus impressionnant pour les conducteurs âgés affectés par une pathologie de l'œil (cataracte, glaucome, dégénérescence de la macula) mais légalement admissible pour conduire. Ceux-ci ont manqué trois fois plus de panneaux que le groupe de jeunes conducteurs. De plus, ils ont fait significativement plus d'erreurs que les personnes âgées saines tant au niveau de l'identification de panneaux écrits que de panneaux comportant uniquement des icônes simples et courantes. Ces observations sont compatibles avec le fait que les personnes âgées ont plus de difficultés à trouver leur chemin (Schlag 1993). Un temps plus long pour parcourir le trajet a également été observé pour les personnes âgées. Ce résultat et l'adoption d'une vitesse réduite de conduite sont des comportements fréquemment observés chez les personnes âgées (Mourant and Rockwell 1972; Wood 1999; Cantin, Blouin et al. 2004). Ce comportement est généralement perçu comme une compensation pour diminuer le niveau de charge cognitive et visuelle. Cette diminution de vitesse a toutefois des conséquences significatives au niveau de la fluidité de la circulation et procure des évidences que le design des routes et de la signalisation doit prendre en compte toute l'étendue des conducteurs incluant les personnes âgées et pas uniquement le conducteur d'âge moyen (Wood 1999).

Comme il fallait s'y attendre, l'utilisation du téléphone cellulaire chez les conducteurs âgés de 70 ans ou plus est beaucoup moins importante que chez les conducteurs plus jeunes. Lors d'un sondage national aux États-Unis, 10 % de la population des 16-24 ans ont répondu utiliser leur cellulaire au volant contre 6 % pour les 25-69 ans et seulement 1 % pour les plus de 70 ans (Glassbrenner 2005). Ces résultats sont peu surprenants, mais il faut s'attendre à ce que le pourcentage d'utilisateurs de plus de 70 ans augmente avec la prochaine génération de personnes âgées qui sera beaucoup plus familière avec la technologie et l'utilisation du téléphone cellulaire que le groupe actuel de personnes âgées.

Puisque la vision et l'attention semblent liées à la performance de conduite et que ces caractéristiques sont souvent diminuées chez les personnes âgées, certains auteurs se sont demandés si un entraînement de l'attention visuelle et une amélioration de cette qualité pouvaient se transférer à la performance de conduite. Ball et al. (1988) ont tout d'abord fait

valoir qu'il était possible d'entraîner et d'augmenter le champ de vision utile des personnes âgées. Ce groupe de recherche a également montré que l'amélioration de la vitesse de traitement, une sous composante du champ de vision utile, diminuait le nombre de manœuvres dangereuses en simulateur (Roemaker, Cissell et al. 2003) et que cet effet était toujours présent 18 mois après l'entraînement. Si ces résultats se confirment et se transfèrent sur la route, l'entraînement de la vitesse de traitement pourrait devenir une composante importante des formations offertes aux aînées pour le maintien ou l'amélioration de leurs habiletés de conduite. D'autres formules ont également été étudiées pour tenter d'améliorer la performance des aînées au volant. Premièrement, il semble que l'entraînement physique incluant notamment des exercices d'étirement pour le haut du corps soit relativement efficace pour améliorer ou à tout le moins maintenir la capacité de conduire des conducteurs âgés ayant des déficits physiques (McCoy, Tarawneh et al. 1993; Marottoli, Allore et al. 2007). Les programmes de formation axés sur l'éducation et le rafraîchissement des connaissances théoriques (en classe) semblent avoir peu d'effet sur la performance de conduite mesurée lors d'un test sur route (Bedard, Isherwood et al. 2004; Owsley, McGwin et al. 2004). Par contre, la combinaison d'une formation théorique (en classe) et pratique (sur route) semble beaucoup plus efficace pour améliorer la performance des conducteurs âgés mesurés par un test sur route (McCoy, Tarawneh et al. 1993; Marottoli, Ness et al. 2007; Bedard, Porter et al. 2008). Toutefois, l'effet des programmes de formation sur le nombre d'accidents demeure inconnu à ce jour, mais il ne fait aucun doute que ces programmes ont le potentiel d'améliorer ou à tout le moins maintenir le niveau de performance des conducteurs âgés.

Concernant les personnes âgées avec une problématique au niveau de la vue, il semble que l'autorégulation et la réglementation soient des méthodes relativement efficaces pour retirer les conducteurs à risque de la route. L'étude de l'évaluation de la vision de Salisbury a mené à des constats intéressants. Au total, 2520 personnes âgées de 65 à 84 ans ont participé à ce projet, cette cohorte incluait des conducteurs et des non-conducteurs. L'étude a été effectuée en deux étapes. La première comprenait une entrevue et des évaluations oculaires et cognitives. La deuxième étape consistait à faire un suivi et refaire l'ensemble des évaluations deux ans plus tard. Dans une analyse de ces données effectuée par Hoffman et al. (2005), dès 1824 conducteurs âgés (65 à 84 ans) initialement rencontrés, 386 avaient

cessé de conduire au moment du suivi. Ceux qui avaient arrêté de conduire étaient plus souvent de sexe féminin, plus âgés, noirs, affectés par des problèmes cognitifs, plus souvent atteints de plusieurs maladies, plus souvent diabétiques et plus dépressifs que les conducteurs âgés toujours actifs. Plusieurs états et modifications des capacités visuelles des conducteurs ont prédit efficacement la cessation de conduire. Les mesures de base (prises lors de la première rencontre) des fonctions visuelles associées à la cessation de conduire incluent l'acuité visuelle, la sensibilité aux contrastes et la perte de champ visuel central ou périphérique inférieur. Certaines diminutions survenues entre les deux évaluations sont également associées à la cessation de conduire incluant la baisse de l'acuité visuelle, du champ visuel central et du champ visuel périphérique inférieur. Si toutes ces variables sont incluses dans le même modèle, l'acuité visuelle de base ainsi que la variation de l'acuité lors du suivi ne sont plus significatives. La sensibilité aux réflexions ainsi que la variation de cette sensibilité ne semblent aucunement liées à une éventuelle cessation de conduire, les auteurs suggèrent que les conducteurs pourraient pallier à ce déficit en limitant leurs habitudes de conduite dans l'obscurité. L'autonomie ressort une fois de plus comme un facteur important de la prise de décision pour la cessation de conduire puisqu'une association importante a été observée entre l'arrêt de conduire et la présence d'un autre conducteur dans la maison. Les auteurs n'ont identifié aucun sous-groupe, incluant les personnes âgées souffrant de démence, qui était moins enclin à abandonner la conduite en présence de problèmes de vision importants. Ce résultat est un peu surprenant puisque Foley et al. (1995) avaient observé que 25 % des personnes atteintes de démence conduisaient toujours un an après le diagnostic démontrant une certaine réticence à abandonner la conduite. Globalement, ces résultats sont en accord avec Owsley et al. (1998) qui avaient observé que les personnes âgées conscientes de leurs déficits visuels autorégulaient leur conduite. Cette étude avait également montré que conduire moins de sept jours par semaine procurait un effet protecteur et diminuait le risque d'accident. L'explication des auteurs était que les conducteurs conduisant moins d'une fois par jour sélectionnaient probablement les moments de leurs sorties pour éviter les conditions difficiles de conduite. Toutefois, ils semblent que les personnes âgées aient tendance à surestimer leurs habiletés de conduite et à s'estimer aussi bonnes sinon meilleures que leurs pairs (Holland 1993; Marottoli, Cooney et al. 1997; Tuokko, McGee et al. 2007; Windsor,

Anstey et al. 2008) et meilleures que les jeunes conducteurs (Groeger and Brown 1989). Lors d'une étude récente, Freund et al. (2005) ont confirmé ces résultats. Pour ce faire, ils ont comparé la perception des habiletés de conduite des conducteurs âgés avec leur performance lors d'une évaluation réalisée en simulateur. Soixante-six pour cent de tous les conducteurs ont estimé leurs habiletés à conduire supérieures à la moyenne alors que 40% des conducteurs ont été jugés non sécuritaires suite à leur évaluation. De plus, les conducteurs qui se considéraient légèrement supérieurs à la moyenne avaient 4 fois plus de chance d'être considérés comme non sécuritaires par rapport aux conducteurs qui s'estimaient de même niveau ou légèrement inférieurs aux autres conducteurs de leur groupe d'âge. Cette étude est intéressante et différente des précédentes parce qu'elle démontre que malgré le fait que tous les sujets avaient été référés (soit par un médecin, soit par la police) pour une évaluation, la perception de leurs habiletés de conduite n'en a pas ou très peu été affectée. Une critique importante pouvant être faite à cette étude concerne l'utilisation du simulateur pour l'évaluation des habiletés de conduite. Toutefois, il est important de mentionner que les auteurs avaient validé leur simulateur et leur protocole lors d'une étude précédente (Freund, Gravenstein et al. 2002).

1.2 Conduite automobile

La conduite automobile constitue un paradoxe important. Tout d'abord, il s'agit d'une tâche relativement facile à apprendre et à maîtriser comme le démontrent les millions d'êtres humains qui conduisent avec succès tous les jours. D'un autre côté, la conduite nécessite l'usage de plusieurs habiletés physiques et psychologies complexes. D'ailleurs tout comme plusieurs autres tâches à priori très simples à effectuer comme la marche, aucun modèle mathématique ou statistique ne permet de prédire la performance de conduite. Toutefois, même si la conduite est une tâche parfaitement maîtrisée et qu'on qualifie souvent de "surprise" puisqu'elle est pratiquée de façon régulière pendant de nombreuses années, il n'en reste pas moins que c'est une tâche relativement récente dans l'histoire de l'humanité (Groeger 1999). Sans le moindre doute, la conduite occupe une place de première importance dans nos vies, elle représente l'autonomie et la liberté. Il n'est donc pas étonnant de voir les personnes âgées littéralement s'accrocher à leur droit de conduire, la perte de ce privilège s'avère un véritable spectre pour cette population. De la

même façon, les jeunes conducteurs sont prêts à faire de nombreux sacrifices pour obtenir leur permis ou acheter leur première voiture. Malgré tout, la moindre erreur en conduite peut causer des dommages matériels et corporels importants voire même être fatale dans certains cas. D'ailleurs, les accidents de la route constituent l'une des principales causes de décès au Canada (Statistique Canada 2006).

1.2.1 Types d'études et méthodologie

Plusieurs auteurs ont étudié la conduite automobile et la sécurité routière. Ces études scientifiques peuvent être divisées en deux grandes catégories : les études à caractère épidémiologique et les études expérimentales réalisées en conditions réelles ou en conditions simulées de conduite. Les études épidémiologiques en conduite sont généralement effectuées par entrevue, par sondage téléphonique ou posté ou par consultation des banques de données des administrations de la sécurité routière. Le taux de réponse des sondages postés, habituellement très bas, limite cette option en conduite, car il s'avère difficile d'obtenir un échantillon représentatif de la population (McCartt, Hellinga et al. 2006). Les banques de données fournissent des informations importantes et primordiales sur la sécurité routière. Cependant, la qualité des données contenues dans les banques de données administratives est souvent remise en question puisqu'elles sont sous-rapportées et incomplètes (Elvik and Mysen 1999). La conduite réelle peut également être subdivisée en deux, la conduite réelle naturelle et la conduite dans un véhicule instrumenté. Dans les deux cas, l'expérimentation peut se faire sur circuit routier ouvert ou fermé à la circulation. Les études dites naturelles sont non-intrusives, réalisées sur une longue période de temps et visent à observer les comportements des conducteurs dans leurs activités journalières et habituelles de conduite. Les études sur route ont l'avantage d'être réalisées en situations réelles de conduite. Il est possible de les subdiviser en deux catégories : études sur circuit fermé et études sur circuit ouvert. Les circuits fermés ont l'avantage d'être beaucoup plus près de la conduite réelle par rapport aux simulateurs. Toutefois, il y a tout de même une différence entre la conduite sur circuit fermé et la conduite naturelle. L'importance de cette différence dépend de la nature du circuit et du protocole de recherche utilisé. Un circuit trop court, trop facile, sans véhicule ou piéton ne nécessitera probablement pas que les conducteurs allouent un niveau de priorité plus important à la conduite qu'ils le feraient en simulateur. La conduite à haute vitesse sur circuit fermé avec

une interaction avec d'autres véhicules amènera possiblement le conducteur à allouer ses priorités à la conduite d'une façon plus fidèle à la conduite normale. Il faut toutefois s'attendre à une différence avec la conduite normale puisqu'une multitude de distractions prévisibles ou non peuvent survenir à tout instant (Goodman, Tijerina et al. 1999).

Les études sur route en circuit ouvert procurent le plus haut niveau de réalisme. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle expose le conducteur à une tâche de conduite réelle où il doit prioriser la conduite et la sécurité avant toute autre tâche à défaut d'être impliqué dans un accident. Bien que cette méthodologie puisse sembler plus écologique et plus près de la réalité, elle n'est pas dépourvue de limitations. Les études typiques sur circuit ouvert utilisent un véhicule instrumenté et nécessitent la présence d'un évaluateur qui s'assure du fonctionnement des appareils, de l'acquisition des données et de communiquer les consignes aux participants. Il est probable que cette présence, tout au long du circuit, influence le comportement du conducteur et amène des comportements non naturels (Olsen, Lee et al. 2005). De plus, comme les participants ne sont pas familiers avec le véhicule instrumenté et ses contrôles, une période d'adaptation devra être prévue tout comme une formation sur les différents contrôles du véhicule. Puisqu'il s'agit de conduite réelle, le risque d'accident est également bien réel. Des problèmes éthiques et légaux se posent et il y a ainsi une limitation importante des conditions expérimentales auxquelles il est possible d'exposer les participants (Haigney and Westerman 2001). Par exemple, il est impossible de soumettre les participants à des conditions nécessitant une réaction d'urgence. Les participants sont également conscients qu'ils conduisent un véhicule non familier et que leurs actions sont épiées en tout temps par un inconnu assis dans le siège du passager (Goodman, Tijerina et al. 1999). Finalement, l'environnement externe étant variable, il est impossible d'exposer les sujets à des conditions expérimentales parfaitement contrôlées. Pour minimiser l'influence de la variabilité de l'environnement, les études sur route vont souvent être réalisées en dehors des heures de pointe, sur des routes peu achalandées et dans des situations idéales de conduite où l'interaction avec les autres véhicules est peu importante. Ainsi, les résultats obtenus à partir de ces études représentent souvent le meilleur des scénarios possibles. Une dégradation des conditions de conduite amènera des résultats exacerbés (Patten, Kircher et al. 2004). Certains auteurs ont tenté de minimiser les désavantages liés à l'évaluation sur route et d'en augmenter la validité en utilisant les

technologies telles que les systèmes de positionnement par satellite et la vidéo pour diminuer les problèmes (Porter and Whitton 2002; Huebner, Porter et al. 2006; Marshall, Wilson et al. 2007). Bien que l'analyse de situations de conduite précises soit fastidieuse, une quantité importante d'informations devrait être obtenue via cette technique au cours des prochaines années. Finalement, l'utilisation d'un circuit fermé permet d'obtenir un meilleur contrôle sur l'environnement, mais limite les interactions avec les autres véhicules et diminue les comportements naturels du conducteur.

Les études en laboratoire sont effectuées en simulateur de conduite. Il y a une vaste sélection de simulateurs disponibles allant des consoles de jeu vidéo aux simulateurs haute-fidélités sur base pivotante à six degrés de liberté. Il va sans dire que tous ces simulateurs varient grandement au niveau de leurs capacités et caractéristiques. Au cours des dernières années, les simulateurs de conduite ont été utilisés à de nombreuses reprises. Pour les chercheurs, les simulateurs procurent plusieurs avantages comme l'efficacité, le coût peu élevé d'une évaluation par rapport à un test sur route (simulateurs à base fixe seulement), la sécurité, le contrôle expérimental, la facilité de collecte de données et la possibilité d'exposer les sujets à des situations de conduite inhabituelles et dangereuses. Les résultats de plusieurs études ont montré l'efficacité des simulateurs pour l'évaluation de différentes populations (p. ex. personnes âgées (Roenker, Cissell et al. 2003), handicapés visuels (Carroz, Comte et al. 2008), individus souffrant de démence (Bylsma 1997), individus ayant subi un AVC (Patomella, Kottorp et al. 2008)) et pour différents contextes ou aspects de la conduite (p. ex. vitesse (Bella 2008), attention visuelle (Lee, Lee et al. 2007), apport des systèmes d'aide à la conduite (Scott and Gray 2008), usage du téléphone cellulaire (Strayer, Drews et al. 2006), effets de la fatigue (Ting, Hwang et al. 2008), effets de l'alcool (Meda, Calhoun et al. 2008)). Goodman et al. (1999) ont identifiés trois caractéristiques importantes dans l'usage des simulateurs pour l'étude de la conduite automobile. La première caractéristique concerne la scène visuelle et la qualité des informations transmises au conducteur. Étant donné l'importance de la vision en conduite, les auteurs mettent en garde contre les simulateurs de mauvaise qualité qui fourniraient une quantité insuffisante d'informations visuelles. De plus, la qualité de ces informations est importante, elles doivent être claires et non-confondantes. Il faut éviter que les résultats mesurés soient un artéfact de l'habileté du simulateur à transmettre des informations

visuelles du même type et de la même qualité qu'une scène réelle de conduite. La deuxième caractéristique importante concerne la mobilité de la base. Les simulateurs peuvent avoir ou non une base pivotante et celle-ci peut avoir un ou plusieurs degrés de liberté. Si la base pivotante est absente, certaines informations somatosensorielles et vestibulaires seront absentes et des interrogations doivent être posées à savoir s'il s'agit de la cause des résultats obtenus. Si une base pivotante est présente, la latence, l'amplitude, la durée et la direction des forces générées par le simulateur pourraient ne pas être conformes aux forces fournies en conduite réelle. De plus, la génération de ces forces pourrait ne pas être en parfaite synchronisation avec les informations visuelles créant ainsi un conflit visuomoteur. La troisième caractéristique concerne l'effet du simulateur sur la priorité des tâches. Selon Goodman et al. (1999), les participants peuvent réagir différemment en simulateur puisque les conséquences associées à une erreur sont moins importantes qu'en conduite réelle. Les risques importants associés à une erreur en conduite réelle seraient un facteur suffisamment important pour que les conducteurs maintiennent un bon niveau de performance. Cette incitation indirecte au maintien de la performance serait difficile à reproduire en simulateur. Par exemple, la prédisposition à utiliser un téléphone cellulaire tout en conduisant pourrait être beaucoup plus importante en simulateur qu'en conduite réelle.

Pour toutes les raisons présentées ci-dessus, Goodman et al. (1999) questionnent la validité des études sur la conduite réalisées en simulateur et sur circuit fermé. Ils mentionnent également que malgré tous ces commentaires, il ne faut pas penser que cela signifie que cette méthode n'est pas utile et efficace pour obtenir de l'information. Toutes les méthodologies ont une place au niveau de la recherche en sécurité routière, il faut simplement en connaître les limitations. Il est toutefois fort probable que les conducteurs adoptent des comportements différents alors qu'ils se retrouvent seuls au volant de leur véhicule et qu'ils adoptent des comportements à risque qu'ils n'adopteraient pas nécessairement lors d'une expérimentation (p. ex. utilisation du téléphone cellulaire, manger au volant, se coiffer au volant, etc.). Le risque étant moins important en simulateur, il n'est pas certain que les décisions prises par les participants seront les mêmes qu'en conduite réelle. Les expérimentations en conduite réelle sur circuit routier ouvert ou fermé ne permettent pas non plus de bien évaluer les participants puisqu'il est impossible de les mettre dans des situations à risque ou de surcharge. Si la théorie proposée par Hancock et

Warm (1989) qui veut que la performance des conducteurs se détériore soudainement à l'atteinte d'un seuil de surcharge attentionnelle mais très peu avant est exacte, il est fort possible que les études où la charge cognitive est basse ne montrent aucune diminution de la performance.

1.2.2 Mesures de la performance de conduite

Le nombre d'accidents et d'infractions du Code de la route sont des variables fréquemment utilisées pour évaluer la performance d'un conducteur. Malgré l'aspect pratique associé à l'utilisation de ces variables, les difficultés statistiques assorties à la prédiction d'un événement aussi exceptionnel et multifactoriel limitent l'utilité de ces mesures comme indice de la performance. Ainsi, d'autres variables doivent être utilisées pour quantifier la performance des conducteurs. Contrairement à bien des tâches où il est facile de déterminer les éléments importants de la performance, la conduite est beaucoup plus complexe à caractériser. Qu'est-ce qu'une bonne performance? Respecter le Code de la route, être un conducteur courtois, anticiper les comportements des autres conducteurs ou demeurer dans sa voie? Il n'y a pas de réponses simples à cette question. Du point de vue de la sécurité routière, le conducteur d'une caravane roulant à 20 km/h sous la limite de vitesse permise au travers de jeunes conducteurs respectueux du Code de la route mais pressés de retourner à la maison est probablement beaucoup plus à risque de causer un accident que s'il se retrouve au travers de conducteurs de caravanes. De la même façon, le jeune conducteur pressé est possiblement beaucoup plus à risque s'il est entouré de conducteurs âgés que de jeunes conducteurs adoptant des comportements de conduite semblables aux siens. Ces exemples montrent que des mesures différentes du nombre d'accidents et d'infractions de la route doivent être utilisées pour caractériser la performance d'un conducteur.

Conduire une automobile nécessite un partage efficace des ressources pour la réalisation de tâches simultanées reliées à la conduite. Selon Seppelt et Wickens (2003), il y a deux groupes principaux de tâches impliqués dans la conduite: les tâches immédiates et les tâches périphériques. Les tâches immédiates sont cruciales pour la conduite et incluent de demeurer sur la route, de maintenir un déplacement vers l'avant et d'identifier et de réagir à tout événement pouvant affecter le conducteur. Les tâches périphériques sont moins importantes à la réussite globale de la tâche de conduite et incluent de surveiller la vitesse

et de visualiser l'environnement interne et externe du véhicule. Les tâches immédiates et périphériques peuvent être influencées par une distraction. Ces tâches et les différentes variables dépendantes qui en découlent sont souvent utilisées pour quantifier la performance de conduite. Par exemple, en simulateur et lors de tests sur route, le nombre de violations peut être utilisé comme indice général de la performance. On inclut généralement dans cette catégorie le nombre de fois où la limite de vitesse est dépassée, les omissions d'arrêt à une intersection et les violations de voie (centre et bordure de route). La stabilité de la conduite est également souvent utilisée. Pour ce faire, les variables de prédilection sont la vitesse moyenne, la variabilité de la vitesse, le déplacement latéral du véhicule et la variabilité de ce déplacement. Il est postulé que certains changements de comportements puissent refléter des adaptations ou des compensations à une surcharge attentionnelle. Ces compensations permettraient au conducteur de maintenir un niveau de charge attentionnelle qui lui semble sécuritaire (Haigney, Taylor et al. 2000). Le plus fréquent de ces comportements est la diminution de la vitesse du véhicule (Brookhuis, de Vries et al. 1991; Patten, Kircher et al. 2004). Les comportements de freinage sont également souvent utilisés pour quantifier les changements de comportement face aux différentes situations de conduite. Hancock (2003) les a notamment utilisés pour décrire les effets d'une conversation au téléphone cellulaire lors d'une situation de freinage à une intersection.

1.2.3 Évaluation des conducteurs

Il ne fait aucun doute que la conduite est une tâche hautement visuelle et il est souvent suggéré que le taux accru des accidents associés au vieillissement pourrait survenir en grande partie en raison de changements au niveau de la vue et/ou de la vision. Les caractéristiques de la vision telles que l'acuité, la vision des contrastes, l'amplitude du champ visuel, etc. ont été étudiées depuis de nombreuses années et par de nombreux auteurs. Malgré tout, aucune ou très peu de relation n'a pu être établie entre ces évaluations statiques de la vue, les problèmes de santé, le niveau fonctionnel, l'état cognitif et la fréquence de l'implication dans les accidents de la route (Kline, Kline et al. 1992; Waller 1992; Ball and Owsley 1993; Owsley and McGwin 1999; Keeffe, Jin et al. 2002).

L'acuité visuelle est certainement la qualité visuelle la plus ambiguë en ce qui concerne son importance en conduite automobile. Cette qualité visuelle est pratiquement évaluée par tous

les bureaux de délivrance de permis de conduire du monde même s'il semble y avoir très peu de support pour une forte association entre l'acuité visuelle et l'implication dans les accidents de la route (Owsley and McGwin 1999; Rubin, Ng et al. 2007). En contrepartie, les personnes avec une acuité visuelle faible sont plus susceptibles de rapporter des difficultés à conduire et à éviter les situations exigeantes de conduite (Keeffe, Jin et al. 2002). Il est, toutefois, important de rapporter qu'un faible résultat au test d'acuité visuelle est associé à une diminution de la reconnaissance des panneaux de circulation. Ce comportement ne serait toutefois pas associé à un mauvais jugement aux intersections (Higgins, Wood et al. 1998). Wood (1999) fait partie des auteurs ayant étudié les liens entre l'acuité visuelle et la performance de conduite. Plutôt que d'utiliser le nombre d'accidents comme indice de la performance de conduite, l'auteure a fait exécuter différentes tâches aux conducteurs comme la détection de panneaux de circulation, le temps de réaction associé à la détection de cibles situées dans le pare-brise du véhicule, l'estimation de la vitesse de leur véhicule et le temps de conduite. À l'exception du temps de réaction associée à la détection de cible en vision centrale, aucune corrélation entre l'acuité visuelle et la performance de conduite n'a été observée. À première vue, il peut sembler anormal qu'un test d'acuité visuelle à haut contraste ne soit pas corrélé avec la performance lors d'une tâche d'identification de panneaux de signalisation qui comprennent de l'écriture et des icônes hautement contrastantes avec l'arrière-plan. Toutefois, comme les sujets étaient en mouvement par rapport aux panneaux et qu'ils devaient partager leurs ressources attentionnelles entre différentes tâches, plusieurs niveaux sont impliqués dans le processus et l'œil n'est pas nécessairement la limitation lors de cette performance. Par exemple, il est bien établi que les personnes âgées réussissent beaucoup moins bien lors d'expérimentation de double tâche par rapport aux jeunes adultes (Ponds, Brouwer et al. 1988).

Owsley (1999) suggère qu'une des possibilités permettant d'expliquer historiquement la présence du test de Snellen (acuité visuelle) lors de l'évaluation des capacités à la conduite automobile est que ce test était abondamment utilisé par les cliniciens à l'époque où les évaluations pour l'obtention du permis de conduire ont été mises en place. De plus, ce test étant très simple, il peut être administré par du personnel non qualifié. Plusieurs raisons permettent d'expliquer cette faible association entre la performance au test de Snellen et la conduite. Premièrement, le test de Snellen a été élaboré pour établir des

diagnostics cliniques et ne reflète aucunement la complexité de la tâche de conduite. Ce test diminue les distractions et minimise les effets d'une double tâche (Ball, Owsley et al. 1998). De plus, l'environnement d'un conducteur est constamment en mouvement ce qui n'est pas le cas lors de l'évaluation clinique de l'acuité visuelle. Finalement, en raison des restrictions présentes à l'attribution du permis de conduire en ce qui concerne le niveau minimal d'acuité visuelle nécessaire, très peu de gens avec une vision déficiente (en terme d'acuité visuelle) se retrouvent sur la route ce qui pourrait expliquer, en partie, la faible relation observée entre les accidents de la route et la performance au test de Snellen. Toutefois, cette dernière explication semble discutable à la lumière des résultats de l'étude de l'évaluation de la vision de Salisbury où les auteurs ont été étonnés d'observer que 208 (11.5 %) participants sur les 1801 inclus dans leur cohorte n'auraient pas dû obtenir un renouvellement de permis sans limitation dans l'état du Maryland puisqu'ils présentaient une acuité visuelle inférieure à 20/40 pour au moins un œil (Rubin, Ng et al. 2007). D'autres auteurs ont évalué la relation entre les accidents de la route et l'acuité visuelle mesurée dynamiquement (Keeffe, Jin et al. 2002) ou effectuée dans des conditions faibles de luminosité (West, Gildengorin et al. 2003; Rubin, Ng et al. 2007). Dans les deux cas, la relation observée s'est avérée à peine plus élevée que pour l'acuité statique.

La diminution de la sensibilité aux contrastes est associée à une dégradation de la performance de conduite en simulateur (Wood and Troutbeck 1995), à une augmentation des autorapports de difficultés en conduite (Rubin, Roche et al. 1994), à une autolimitation de l'exposition (Keeffe, Jin et al. 2002) et à une diminution de la capacité à identifier des panneaux de circulation (Evans and Ginsburg 1985). Toutefois, aucune relation n'a été observée entre les évaluations de la sensibilité aux contrastes et la fréquence des accidents (Owsley, Ball et al. 1998; Rubin, Ng et al. 2007). Plusieurs personnes âgées relatent être éblouies en conduite nocturne. Encore une fois, aucune relation n'a été observée entre les tests d'éblouissement et la performance de conduite, les accidents de la route ou même l'augmentation des auto-rapports de difficultés. Les auteurs de cette étude ont toutefois noté une augmentation des autolimitations de la conduite nocturne ce qui peut sembler contradictoire (West, Gildengorin et al. 2003). La vision stéréoscopique a également été associée à une augmentation des autorapports de difficultés (Rubin, Roche et al. 1994) et à une autolimitation de la conduite (West, Gildengorin et al. 2003).

L'amplitude du champ visuel est une autre des caractéristiques visuelles souvent évaluées pour l'obtention du permis. Le champ visuel peut être mesuré par différentes méthodes. La plus simple est la méthode de confrontation où l'examineur compare son propre champ visuel avec celui du sujet. Cette méthode n'est pas très précise, mais elle permet tout de même de discriminer les extrémités du continuum de performance, c'est-à-dire, les pires et les meilleurs. Parmi les nombreuses autres évaluations existantes, la périmétrie est l'une des plus précises. Cette technique évalue l'amplitude du champ visuel à partir d'une calotte sphérique. Le principal avantage de celle-ci est que le stimulus se trouve toujours à égale distance de l'œil. L'amplitude du champ de vision a été liée à une augmentation des accidents chez les conducteurs ayant une limitation importante aux deux yeux contrairement aux individus normaux ou avec une restriction monoculaire (Johnson and Keltner 1983; Keltner and Johnson 1992). Ces études n'ont toutefois pas tenu compte du kilométrage annuel parcouru par les participants. D'autres études (Decina and Staplin 1993; Owsley, Ball et al. 1998) qui l'ont fait n'ont trouvé aucune différence significative en ce qui concerne une implication plus importante des gens avec un champ visuel réduit dans les accidents de la route. Il semble aussi que Keltner et Johnson (1992) aient étudié des gens ayant un déficit du champ visuel beaucoup plus important que ceux étudiés dans les autres études. De leur côté, Coeckelbergh et al. (2002) ont étudié les effets d'un champ visuel réduit sur la performance à la conduite automobile, mesurée à l'aide d'un test sur route, et les stratégies de recherche d'informations utilisées lors de différentes tâches. Cinquante sujets ont participé à l'étude et ont été séparés en cinq groupes selon l'ampleur et le positionnement de la détérioration de leur champ de vision. Les sujets devaient réaliser deux tâches et un test sur route. La première tâche consistait à trouver un « O » parmi une matrice de 19 « C ». La deuxième tâche consistait à compter le nombre de points apparaissant à l'écran selon un patron aléatoire. Les mouvements des yeux ont été enregistrés à l'aide d'un oculomètre pour chacune de ces deux tâches. Le test sur route se déroulait avec la voiture personnelle des sujets et était effectué dans les rues avoisinantes de leur domicile. Il était réalisé par un examinateur du bureau central de délivrance des permis hollandais. Dans les tâches de comptage des points et de recherche visuelle, les sujets atteints d'une détérioration du champ de vision périphérique ont montré une augmentation du nombre de fixations et de la durée de recherche. De plus, dans la tâche de comptage des

points, ces sujets commettaient plus d'erreurs et faisaient des fixations plus courtes que les sujets contrôles. Les résultats en ce qui concerne l'augmentation du nombre de fixations et la durée de recherche sont linéaires. Plus un sujet avait une limitation sévère du champ visuel et plus la durée de recherche était longue et le nombre de fixations élevé. Une relation du même type a aussi été observée pour le nombre d'erreurs commises. Il a aussi été observé qu'aucun des paramètres de mouvement des yeux n'étaient reliés au comportement visuel lors du test sur route. Toutefois, le nombre d'erreurs et la durée de recherche corrélaient significativement avec le score final au test de conduite. L'addition de ces paramètres au modèle n'a toutefois pas permis d'améliorer la puissance de celui-ci pour identifier les conducteurs à risque. La docteure Johanne Wood et son équipe du laboratoire de vision et conduite de l'Université Queensland en Australie ont réalisé une série d'étude sur les pathologies de la vision et la conduite automobile (Wood and Troutbeck 1992; Wood and Troutbeck 1994). Lors de ces études, ils ont évalué l'effet de problèmes visuels simulés sur des conducteurs jeunes et âgés n'ayant aucun problème de vision. Toutes ces études ont été réalisées sur circuit fermé en conduite réelle. Les résultats indiquent que les cataractes et une restriction du champ visuel réduisent significativement la performance de conduite. De plus, cet effet est amplifié pour les personnes âgées. Comme il s'agissait de problèmes visuels simulés, il est difficile de généraliser ces résultats puisqu'il est fort probable que des adaptations et des stratégies de conduite apparaissent au fil du temps pour pallier à certains de ces déficits. Toutefois, les résultats ont depuis été reproduits avec des populations pathologiques (Wood and Mallon 2001; Wood and Carberry 2006). Finalement, la diminution du champ visuel est également liée à une autolimitation des conditions de conduite (West, Gildengorin et al. 2003).

Selon Owsley (1998), il n'y a aucune raison de restreindre la conduite pour les gens souffrant d'un déficit léger du champ visuel puisque ceux-ci semblent développer des mécanismes compensatoires efficaces notamment en ce qui concerne les mouvements de la tête et la coordination œil-tête (Owsley and McGwin 1999). En effet, il y a plusieurs stratégies possibles pour introduire l'information pertinente dans le champ visuel. La rotation des yeux, de la tête et du tronc en sont de bons exemples. Une fois dans le champ de vision, le processus d'attention permet de déterminer ce qui nécessite d'être perçu par la vision centrale (Owsley, Ball et al. 1998; Owsley and McGwin 1999). Des études sur les

mouvements oculaires en conduite ont d'ailleurs montré que les conducteurs balayaient continuellement la scène des yeux pour permettre aux informations en périphérie d'être perçues par la vision centrale (Mourant and Rockwell 1972). La vision centrale est d'environ 3°, c'est la région où l'acuité visuelle et la perception de la profondeur sont optimales. Les limites entre le champ de vision (yeux fixes), le champ de vision étendue (mouvements oculaires permis) et le champ de vision atteignable en raison des rotations de la tête ne sont pas clairement définies. Elles varient substantiellement d'un sujet et d'une situation à l'autre. De plus, certaines études ont montré qu'une augmentation de la charge cognitive, du stress, du bruit ou de l'âge étaient tous des facteurs qui amenaient une diminution du champ visuel de l'œil (Leibowitz and Appelle 1969; Williams 1982). Handy et al. (2001) ont également suggéré que la charge perceptuelle affectait la quantité d'informations visuelles périphériques disponibles. À l'aide de l'électro-encéphalographie (EEG) et de la méthode du potentiel évoqué, ces auteurs ont mesuré que l'amplitude du potentiel évoqué associé à la perception parafovéale diminuait considérablement à mesure que la charge perceptuelle de la région fovéale augmentait. Une fonction importante de la vision périphérique est qu'elle aide le conducteur à rediriger le balayage visuel. Des résultats récents ont d'ailleurs montré une plus grande tendance à fixer et à diminuer le balayage visuel lors de la conduite dans des conditions élevées de charge attentionnelle (Harbluk, Noy et al. 2002). Les notions de champ visuel et d'attention semblent intimement liées et ont mené à un concept appelé champ de vision utile («useful field of view» en anglais). Macworth (1965) a été le premier à définir ce concept en tant que l'aire autour du point central de fixation dans laquelle il est possible de traiter les informations rapidement lors de la réalisation d'une tâche visuelle. Macworth a d'ailleurs été l'un des premiers à associer le concept de «vision tunnelaire» à une augmentation de la charge cognitive.

La notion de champ de vision fonctionnel a été reprise à plusieurs reprises par la suite (Williams 1982; Ball, Beard et al. 1988; Owsley 1994; Gabaude 2002) et a mené à de nouvelles évaluations qui tombaient à point étant donné le peu de succès à cibler les conducteurs à risque avec les évaluations traditionnelles de la vue. L'utilisation de ces nouvelles évaluations semble prometteuse puisque des déficits peuvent non seulement survenir au niveau de l'organe sensoriel de la vue, mais aussi à des niveaux plus élevés mis en jeu dans la prise et le traitement de l'information visuelle. La conduite automobile est

une tâche complexe nécessitant des ressources visuelles et cognitives importantes. Il est illusoire de croire que de simples tests visuels et/ou le diagnostic d'une pathologie de l'œil sont des variables suffisantes pour correctement évaluer la capacité d'une personne à conduire.

La plus intéressante de ces évaluations, et celle qui a reçu le plus d'attention, est le « Useful Field Of View » (UFOV) développé par Ball et al. (1988). Ce test évalue le champ de vision fonctionnel. Les évaluations traditionnelles du champ de vision mesurent l'étendue dans laquelle une cible isolée peut être détectée. Le test du UFOV détecte l'étendue à laquelle une cible isolée ou non (attention sélective) peut être détectée et localisée alors que le participant fixe une autre cible (attention partagée). Ainsi, le test UFOV évalue le champ de vision dans lequel un individu peut rapidement utiliser une information présentée. Owsley et al. (1998) ont montré que les personnes âgées avec un déficit de 40 % ou plus au test UFOV avaient 2.2 fois plus de chances d'avoir un accident de la route dans les trois années suivant l'évaluation. Ces résultats ont été ajustés pour l'âge, le sexe, le statut mental, les conditions médicales et l'exposition à la conduite. Des résultats similaires ont été obtenus par Rubin et al. (2007) confirmant l'importance de l'utilisation du test UFOV pour la détection des conducteurs à risque. Selon Sekuler et Blake (1994), il n'y a aucune relation entre la grandeur du champ visuel d'un individu et l'amplitude du champ de vision fonctionnel telle que mesurée avec le test UFOV. Les tests statiques mesurant le champ de vision ne peuvent donc pas remplacer le test du UFOV pour l'évaluation des conducteurs. L'ensemble de ces résultats montre l'importance de l'attention visuelle et de la vitesse d'intégration de ces informations dans l'évaluation des conducteurs. Ce type de test s'avère d'une plus grande efficacité que les évaluations traditionnelles de la vue (Owsley and McGwin 1999). D'autres auteurs ont confirmé ces résultats (Rizzo, Reinach et al. 1997; Duchek, Hunt et al. 1998). La cause probable de la diminution de la performance associée au vieillissement lors du test UFOV semble être au niveau de l'intégration de l'information (Sekuler and Blake 1994). Le concept d'attention visuelle avait été relié aux accidents de la route par différents auteurs (Kahneman, Ben-Ishai et al. 1973; Panek, Barrett et al. 1977) dans les années 70 mais avait été relégué aux oubliettes depuis. Toutefois, la valeur prédictive du test UFOV a été remise en doute récemment (Bedard, Weaver et al. 2008; Hoffman, McDowd et al. 2005). Il semble que le niveau de sensibilité et de spécificité à

prédire les accidents de la route ne soit pas aussi fort si, à priori, les groupes sont représentatifs de l'ensemble de la population au niveau de la fréquence des accidents. Malgré cette critique envers le UFOV et sa capacité à prédire l'implication dans les accidents de la route, une relation statistique a été observée entre la performance de conducteurs lors d'évaluation sur route et le résultat au test UFOV (Myers, Ball et al. 2000; Novack, Banos et al. 2006) ou en simulateur de conduite (Hoffman, McDowd et al. 2005). Un nouveau test de l'attention visuelle (DriverScan) a récemment vu le jour. Celui-ci s'est avéré encore plus efficace que le UFOV pour prédire la performance de conduite en simulateur (Hoffman, McDowd et al. 2005). Toutefois, tout comme le test UFOV dans cette étude, le DriverScan n'a pas été suffisamment sensible pour prédire l'historique des accidents de la route survenus dans les trois années précédentes. Contrairement au UFOV, le DriverScan présente des scènes réelles de conduite ce qui le rend plus pertinent pour l'évaluation des conducteurs selon les concepteurs. Cependant, comme toutes les évaluations de l'attention visuelle, la priorité accordée aux différents éléments de la scène et à leur importance relative diffère sans doute de la conduite réelle. Sur la route, il est probable que les personnes âgées développent des stratégies de recherche d'informations différentes pour pallier à leur déficit au niveau de l'attention visuelle et les évaluations de l'attention visuelle n'en tiennent pas compte.

Au Québec, la conduite d'un véhicule de promenade (masse nette de moins de 2500 kg) nécessite d'avoir une acuité visuelle égale ou supérieure à 6/15 (échelle de Snellen) pour l'œil dont l'acuité visuelle est la meilleure. Si l'acuité du meilleur œil est inférieure à 6/15 et inférieure à 6/18 pour l'autre œil ou à 6/15 pour les deux yeux ouverts simultanément, le permis n'est pas délivré et le candidat devra consulter un optométriste ou un ophtalmologiste. Les requérants doivent aussi posséder un champ visuel binoculaire continu de 100° dont 30° de chaque côté de la ligne médiane verticale. La vision binoculaire et la vision des couleurs ne sont pas évaluées pour la conduite d'un véhicule de promenade, elles le sont toutefois pour les véhicules lourds. Plusieurs autres normes médicales sont prévues au règlement pour la délivrance d'un permis de conduire. En général, les normes sont plus sévères pour les conducteurs professionnels. Les personnes âgées doivent passer une évaluation médicale et optométrique à 75 ans, à 80 ans et aux deux ans par la suite. La reconnaissance des couleurs rouge, jaune et verte est encore

évaluée au Québec en vue de l'obtention du permis. Comme la position, la forme et la luminance des feux de circulation sont maintenant normalisées, cette évaluation n'est plus effectuée pour restreindre le droit de conduire, mais plutôt pour s'assurer que le conducteur est conscient de sa condition et qu'il a les connaissances pour y pallier (Société de l'Assurance Automobile du Québec 1999). Vingrys et Cole (1988) ont fait une revue de littérature sur le sujet et ont conclu qu'il n'y avait aucune association entre un déficit de la reconnaissance des couleurs et l'implication dans un accident de la route. Ainsi, au Québec toutes les évaluations effectuées sont des évaluations de la vue. En aucun cas, la vision n'est évaluée.

1.2.4 Attention, distraction et conduite

Dans le contexte de la conduite automobile, les distractions incluent toutes les tâches non nécessaires à la réalisation de la tâche primaire (la conduite). Parmi les plus fréquentes distractions observées figurent l'observation de panneau publicitaire en bordure de la route, la manipulation du poste de radio ou de la ventilation et la conversation avec un passager ou au téléphone cellulaire. L'attention visuelle et les distractions sont deux concepts indissociables pour l'étude de la conduite automobile. Verwey (1993) a estimé qu'une source d'inattention jouait un rôle dans 30 à 50 % des accidents de la route. De son côté, Wang (1996) a été plus conservateur en estimant ce pourcentage à 25 %. Le pourcentage exact est toutefois inconnu puisqu'il est dans la plupart des cas impossible de déterminer si l'inattention est à l'origine de l'accident ou simplement un effet du hasard. Ces études sont basées sur l'analyse des rapports d'accident, mais en étudiant directement les comportements, il semble que le pourcentage soit encore plus élevé. Ce constat provient des auteurs d'un important projet de recherche, réalisé en Virginie, intitulé « the 100-car naturalistic driving study ». Ce projet, financé par le National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), a observé 240 conducteurs à l'aide de 100 véhicules instrumentés (accéléromètres longitudinaux et latéraux, GPS pour la direction et cinq caméras vidéo) sur une période d'un an. Plus de 3.2 millions de kilomètres ont été conduits par les sujets. Au total, 82 accidents et 761 accidents évités de justesse (situations nécessitant une manœuvre rapide pour éviter un accident) ont été enregistrés et analysés. Dans 78 % des accidents et 65 % des accidents évités de justesse, une forme de distraction a été observée par les chercheurs. Les conducteurs inexpérimentés sont les plus souvent

impliqués dans les accidents impliquant une distraction et leurs stratégies visuelles de recherche d'informations ont souvent été questionnées (Underwood, Chapman et al. 2003; Underwood 2007).

À l'opposé, quand la charge attentionnelle est très basse le risque semble également élevé. Dans cette situation, l'inattention et les distractions peuvent apparaître et la performance se dégrade également (Parasuraman, Molloy et al. 1993). Baulk et al. (2001) ont tenté de quantifier la somnolence et la fatigue des conducteurs avec la technique du temps de réaction suite à un stimulus sonore (PRTT: "Probe Reaction Time Technique"). Cette étude a été réalisée en simulateur. Pour la condition de référence, les conducteurs devaient conduire pour une période de 2 heures sur un circuit monotone. Les sujets devaient revenir une semaine plus tard pour réaliser la condition expérimentale qui était semblable en tout point à la condition de référence à l'exception que des stimuli sonores survenaient à différents endroits du scénario de conduite. Ces stimuli étaient distancés les uns des autres de 50 à 300 secondes (moyenne = 150 s). Pour les 2 conditions, la période de sommeil des sujets a été restreinte à 5 heures la nuit précédant l'expérimentation. L'hypothèse de base était que le temps de réaction d'un conducteur augmenterait considérablement et linéairement avec l'augmentation de la somnolence. Cette hypothèse est à contre-courant de la théorie des trois états de vigilance proposés par Hancock et Warn (1989). Cette théorie suggère que la diminution de la performance en situation de surcharge ou de perte de vigilance n'est pas graduelle, mais plutôt soudaine et importante quand le seuil de tolérance est atteint. La méthode PRTT ne s'est pas montrée suffisamment sensible pour quantifier la somnolence. L'évaluation subjective de la somnolence a également été moins importante dans la condition expérimentale. Tous ces résultats renforcent la théorie des trois états de Hancock et Warn (1989) et limitent grandement l'utilisation de la méthode PRTT pour mesurer la somnolence des routiers. Le devis expérimental utilisé dans cette étude est contestable puisque l'usage de la technique PRTT et le court interval de temps entre chacun des stimuli utilisés influencent le niveau d'éveil du conducteur alors que c'est spécifiquement ce que les auteurs tentaient de quantifier. Par contre, la technique PRTT est utilisée dans la conception de systèmes embarqués pour maintenir la vigilance des conducteurs. L'étude de l'efficacité de cette méthodologie à maintenir le conducteur éveillé et vigilant est donc pertinente. En nécessitant une activité plus importante de la part des

participants, la méthode PRTT a maintenu leur état d'éveil à un niveau plus important et amélioré leur performance de conduite. Celle-ci a été mesurée à partir du nombre d'incidents (forte tendance non significative). Les auteurs ont conclu leur article en faisant une mise en garde contre l'utilisation de système PRTT plus agressifs puisque ceux-ci ont le potentiel de distraire le conducteur plutôt que de le maintenir éveillé.

1.2.4.1 Stratégies visuelles de recherche d'informations et conduite

L'attention visuelle est une ressource limitée et tous les objets d'une scène de conduite ne peuvent pas être observés et interprétés. En conduite rurale où la densité de la circulation est faible, la majorité des manœuvres de conduite peuvent être effectuées sans difficulté puisque le système attentionnel n'est pas utilisé à pleine capacité. Les capacités attentionnelles restantes peuvent même être allouées à des stimuli intéressants, mais sans signification pour la tâche de conduite. Dans ces circonstances, il est peu probable que les distractions aient des conséquences critiques. Crundall et Underwood (1998) ont d'ailleurs observé des fixations oculaires plus longues qui sont indicatives d'un balayage visuel moins important et d'une charge attentionnelle plus basse dans les situations de conduite rurale. Dans des conditions de conduite plus exigeantes, la demande sur le conducteur peut être suffisamment importante pour que les ressources cognitives deviennent insuffisantes pour permettre la perception et le traitement de tous les stimuli pertinents dans l'environnement. Dans ces situations de surcharge, le conducteur doit être en mesure de sélectionner et d'interpréter les stimuli prioritaires ce qui lui permettra de prendre de bonnes décisions et d'éviter les accidents.

Comme il fallait s'y attendre et peu importe le niveau d'expérience du conducteur, la position privilégiée du regard lors de la conduite en ligne droite se situe droit devant la voiture (Mourant and Rockwell 1972). Lorsque les conducteurs expérimentés détournent le regard, il semble que ce soit pour inspecter à droite et à gauche la bordure de la route et tous les stimuli qui s'y trouvent (piétons, voitures stationnées, vélos, etc.). Chapman et Underwood (1998) ont décrit ce patron de recherche d'informations comme une ellipse où la majorité des fixations se situent sur l'axe horizontal et quelques unes seulement au niveau de l'axe vertical. Le patron de recherche adopté par les conducteurs inexpérimentés est beaucoup moins systématique. Le balayage horizontal est moins étendu et un nombre

plus élevé de fixations oculaires est effectué dans le plan vertical (Mourant and Rockwell 1972). De plus, ces conducteurs s'adaptent beaucoup moins à l'environnement et au changement de la densité de la circulation contrairement aux conducteurs expérimentés qui anticipent les zones à risque en y jetant un regard régulièrement (Crundall and Underwood 1998; Underwood, Crundall et al. 2002; Falkmer and Gregersen 2005). Deux hypothèses ont été avancées pour tenter d'expliquer pourquoi les conducteurs inexpérimentés ne balayaient pas la route des yeux alors qu'il semble que ce soit un comportement nécessaire pour la conduite sécuritaire. La première suggère que les conducteurs inexpérimentés ont une mauvaise perception des dangers pouvant survenir dans certaines situations (Miltenburg and Kuiken 1991). La deuxième hypothèse est que les conducteurs inexpérimentés sont incapables d'allouer suffisamment de ressources attentionnelles au balayage visuel parce que la pratique et l'expérience insuffisantes n'ont pas permis d'automatiser les tâches de contrôle de la direction et de contrôle de la vitesse du véhicule (Underwood 2007). Recartes et Nunes (2003) ont renforcé cette hypothèse en montrant que les conducteurs expérimentés avaient des comportements similaires en situation de surcharge attentionnelle causée par l'introduction d'une tâche secondaire. Crundall et al. (2003) ont évalué les stratégies de recherche d'informations de policiers effectuant régulièrement des poursuites automobiles. Leur étude incluait trois groupes de conducteurs. Le premier était composé de policiers ayant en moyenne 22 ans d'expérience, le deuxième était formé de conducteurs non policiers ayant le même nombre d'années d'expérience et le troisième groupe était composé de conducteurs peu expérimentés ayant en moyenne trois ans d'expérience de conduite. Les deux groupes non policiers ont montré un balayage horizontal comparable suggérant que trois années d'expérience étaient suffisantes pour développer le patron moteur commandant le balayage des yeux en conduite. Le groupe de policiers a toutefois montré un balayage plus important et étendu et des fixations oculaires d'une plus courte durée que les deux groupes de conducteurs non policiers. La première hypothèse ne doit pas être écartée pour autant. Crundall, Underwood et al. (1999) ont utilisé des séquences vidéo de scènes de conduite pour libérer les conducteurs inexpérimentés du contrôle du véhicule. Ils ont observé que des stratégies de balayage visuel différentes de la part des conducteurs inexpérimentés en comparaison des conducteurs expérimentés. Ce résultat montre que même en ayant les ressources cognitives nécessaires disponibles, les

deux groupes de conducteurs perçoivent et traitent l'environnement visuel d'une façon différente. Liu (1998) a étudié les transitions et les séquences de fixations oculaires entre différentes zones informatives de la scène et a noté que certaines transitions étaient statistiquement plus probables que d'autres de survenir. Chez les conducteurs novices, les seules transitions observées, peu importe le type de route et la densité de circulation, permettaient au conducteur de ramener l'axe du regard sur la route à partir de tout autre emplacement sur lequel le regard s'était posé préalablement. De leur côté, les conducteurs expérimentés ont montré des séquences de fixations beaucoup moins stéréotypées et beaucoup plus variables en fonction du type de route et de la densité de la circulation. Ce résultat suggère que les conducteurs expérimentés s'adaptent plus efficacement aux différentes situations possiblement en raison d'une représentation interne des dangers potentiels beaucoup plus raffinées.

La durée des fixations oculaires montre également des tendances intéressantes bien que celles-ci puissent à priori sembler contradictoires. Au fur et à mesure que la scène visuelle se complexifie, la durée des fixations diminue et la quantité de mouvement oculaire s'accroît (Luoma 1984; Chapman and Underwood 1998; Sodhi, Reimer et al. 2002; Reimer and Sodhi 2006). Toutefois, la durée des fixations augmente en présence d'un danger reflétant probablement la reconnaissance de celui-ci par le conducteur qui allonge ses fixations oculaires pour traiter adéquatement toute l'information disponible (Chapman and Underwood 1998).

Chapman et al. (1998) ont voulu vérifier s'il était possible d'améliorer les stratégies visuelles de jeunes conducteurs à l'aide d'un entraînement spécifique. Pour ce faire, ils ont recruté 143 conducteurs nouvellement titulaires d'un permis de conduire qu'ils ont aléatoirement séparé en deux groupes. Chacun des conducteurs a par la suite été évalué à trois reprises au cours de leur première année de conduite. L'expérimentation consistait en deux parties bien distinctes, une première partie sur route et une deuxième partie en laboratoire où les mouvements oculaires étaient mesurés alors que les sujets observaient des séquences vidéo de situations de conduite. L'un des groupes a reçu une formation après la première évaluation. La formation consistait à faire visionner au conducteur une série de séquences vidéo interactives de situations de conduite l'amenant à augmenter le balayage

visuel de la scène. Le groupe expérimental a modifié ses stratégies oculaires autant sur la route que lors de l'observation de vidéo. Une augmentation du balayage horizontal et une diminution de la durée des fixations ont notamment été observées. Ces résultats sont intéressants puisqu'ils montrent qu'il y a eu un transfert des habiletés acquises lors de la formation vers la conduite réelle. Toutefois, les auteurs rapportent que les conducteurs ayant reçu la formation adoptaient des stratégies de recherche d'informations similaires pour chacune des situations de conduite contrairement aux conducteurs expérimentés qui adaptent leur stratégie aux conditions. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un problème important, ce résultat montre que les conducteurs inexpérimentés adoptent une stratégie consciente contrairement aux conducteurs expérimentés pour qui ce processus semble automatique. Il n'est pas connu si les conducteurs inexpérimentés adoptent cette stratégie consciente dans une situation de surcharge attentionnelle.

Les effets de la complexité de la scène et d'une augmentation de la charge cognitive sur les stratégies de recherche d'informations ont également été étudiés. Recartes et Numes (2000) ont examiné les effets de la réalisation de tâches cognitives sur les comportements oculaires des conducteurs. Cette étude a été réalisée sur circuit routier et une tâche verbale ou visuelle devait être exécutée par les participants à la demande d'un expérimentateur présent dans le véhicule. Les auteurs ont observé que le champ visuel fonctionnel des conducteurs était réduit lors de l'exécution de l'ensemble des tâches et que ce phénomène était exacerbé pour les tâches visuelles. De plus, les fixations oculaires étaient plus longues pour les tâches visuelles. Finalement, le nombre de fixations dans le rétroviseur arrière et sur l'odomètre a diminué. Sodhi (2002) a également observé les comportements oculaires des conducteurs sur la route, mais il a préféré utiliser des tâches naturelles et familières (p. ex. noter le prix de l'essence, répondre à un appel, ouvrir la radio, etc.). Les sujets ont montré des temps de fixation plus longs pour réaliser les tâches nécessitant une prise d'informations plus importante. Par exemple, regarder dans le rétroviseur arrière et modifier la fréquence radio ont nécessité des fixations plus longues que de regarder l'odomètre. Encore plus intéressant, les conducteurs ont montré une variabilité au niveau de la position de l'axe du regard moins importante pendant qu'ils effectuaient les tâches secondaires impliquant un téléphone mains libres et un téléphone cellulaire à main. Ce résultat signifie que les conducteurs ont balayé l'environnement des yeux d'une façon

différente. Il est toutefois impossible de déterminer s'il s'agit d'un comportement à risque puisque rien n'indique que la fréquence des balayages était insuffisante pour une conduite sécuritaire. Olsen et al. (2005) ont de leur côté observé les stratégies oculaires associées à la réalisation d'une tâche complexe de conduite en opposition à la conduite en ligne droite. La tâche sélectionnée était le changement de voie et les auteurs avaient pour objectif de documenter cette manœuvre pour éventuellement développer des systèmes anticollisions. Les auteurs ont observé une augmentation importante du nombre de fixations en direction du rétroviseur arrière, du rétroviseur de gauche, de la fenêtre de gauche et de l'angle mort du véhicule dans une condition où le sujet devait passer de la voie de droite à la voie de gauche contrairement à une condition contrôle de conduite en ligne droite.

Les comportements oculaires des conducteurs âgés ont également fait l'objet de quelques études. La plus intéressante est possiblement celle d'Underwood et al. (2005) malgré le fait qu'ils aient utilisé des séquences vidéo préenregistrées plutôt que de la conduite réelle ou simulée. L'une des particularités de cette étude est qu'ils ont évalué des conducteurs âgés sains et qu'ils les ont comparés avec des conducteurs expérimentés. Très peu de différences ont été observées entre les deux groupes au niveau des stratégies visuelles employées et de la fréquence de détection d'un danger. Il est toutefois important de noter que les personnes âgées ont globalement perçu les situations plus hasardeuses que les conducteurs plus jeunes. Ce résultat montre possiblement un inconfort des personnes âgées avec la vitesse de conduite adoptée dans les séquences vidéo ce qui aurait pour conséquence de dénaturer leurs réactions et possiblement d'affecter leurs comportements lors des situations présentées. Maltz et Shinar (1999) ont également étudié les stratégies visuelles employées par les personnes âgées. Cette étude a utilisé un protocole développé par Schieber (1989) qui permet d'évaluer les différences attribuées à l'âge dans une tâche de recherche d'informations. Ce protocole est relativement simple, la tâche du sujet étant de repérer dans l'ordre quatorze chiffres (1 à 14) positionnés sur différentes régions d'une image. Les photographies présentées étaient celles d'intersections. Les personnes âgées ont montré des épisodes de recherche d'informations significativement plus longs que les jeunes adultes. Cette augmentation de la durée de la recherche semble attribuable à une augmentation du nombre de fixations plutôt qu'à une augmentation de leur durée. Ceci pourrait être causé par une recherche d'informations incomplète et une déficience de la capacité à extraire

l'information d'une fixation oculaire. Les personnes âgées ont aussi montré une très forte variabilité inter et intra sujet ce qui démontre l'importance d'évaluer ce groupe d'individus sur une base individuelle. Bien que cette étude montre clairement des différences au niveau du traitement de l'information visuelle, les tâches effectuées ont peu de points en commun avec la conduite réelle et il n'est pas évident que des résultats semblables auraient été obtenus sur la route.

En 2005, le chercheur Heikki Summala et son équipe ont publié une étude (Wikman and Summala 2005) sur les effets du vieillissement au niveau du partage temporel lors d'une tâche visuelle de recherche d'informations suivi d'une réponse manuelle ou vocale en situation réelle de conduite. La première tâche des conducteurs consistait à activer dans l'ordre numérique ascendant les touches d'un clavier numérique de 20 cm par 23 cm positionné à l'intérieur du véhicule sur lequel était dispersé 8 chiffres (1 à 8). La deuxième tâche était similaire à la première à l'exception que la réponse était fournie vocalement par les sujets. Les résultats de ce projet sont intéressants, et ce, malgré le fait que le groupe des personnes âgées était relativement jeune (moyenne d'âge = 67 ans). Les conducteurs âgés ont montré de nombreux comportements à risque pour la conduite contrairement aux deux groupes de jeunes conducteurs (moyenne d'âge = 22 et 34 ans respectivement). Les personnes âgées ont dû allouer plus d'attention visuelle pour compléter la tâche ce qui signifie qu'ils ont gardé les yeux en dehors de la route plus longtemps que les jeunes conducteurs. Près de la moitié des conducteurs âgés ont même maintenu l'axe du regard en dehors de la route pour des durées continues de plus de deux secondes ce qui n'a jamais été le cas pour les jeunes conducteurs. Wierwille (1993) considère d'ailleurs que la limite maximale pour une conduite sécuritaire devrait être de 2 secondes. Le temps nécessaire pour accomplir la tâche a également été significativement plus long en faveur des conducteurs âgés. Ce résultat montre un ralentissement général au niveau du traitement des informations visuelles présentées. En fait, une seule personne âgée a été plus rapide que le plus lent des jeunes conducteurs. Certains paramètres de conduite comme la vitesse qui a été réduite lors de la réalisation de la tâche secondaire ont également été modifiés avec le vieillissement. Une réduction de la vitesse est considérée comme un comportement compensateur ou encore comme une incapacité à contrôler la vitesse lors de la réalisation d'une tâche secondaire nécessitant une quantité importante de ressources attentionnelles

(Wikman and Summala 2005). En résumé, les auteurs ont conclu que les personnes âgées montraient un ralentissement général et nécessitaient plus de temps pour réaliser la tâche secondaire ce qui représente un comportement de conduite à risque particulièrement lorsque cette tâche nécessite que le conducteur quitte la route des yeux.

Une étude d'Isler et al. (1997) sur l'amplitude des rotations scéhaliques a révélé qu'il y avait des différences significatives entre les participants âgés et les participants plus jeunes. Les personnes âgées de plus de 60 ans ont montré des mouvements plus restreints que les plus jeunes. La diminution de l'amplitude des rotations autour de l'axe vertical était d'environ 30 % par rapport au groupe des moins de 30 ans. Cette réduction est possiblement due à la présence d'arthrite au niveau des vertèbres cervicales, à la tonification musculaire et à des changements neurologiques. Allan et al. (1974) ont comparé la performance de participants lors d'une tâche de conduite simulée selon deux conditions de contrainte des mouvements céphaliques, c'est-à-dire, avec et sans limitation. Ils ont déterminé que lors de la condition avec limitation de mouvements, les sujets faisaient plus d'erreurs, moins de réponses d'ajustements et modifiaient leur point de fixation visuel plus souvent. Une limitation des mouvements articulaires du cou additionnée à un déficit visuel peuvent théoriquement résulter en un délai de perception plus long des véhicules et des obstacles ce qui pourrait signifier une diminution du laps de temps disponible pour l'estimation des distances et l'évaluation de la décélération du véhicule. Par conséquent, la fenêtre temporelle disponible pour que le conducteur fournisse une réponse appropriée serait diminuée (Isler, Parsonson et al. 1997). Les saccades oculaires permettent des mouvements plus rapides que les rotations de la tête (Sanders 1993) et des mouvements fréquents des yeux permettent un balayage plus efficace de l'environnement que les mouvements de tête (Rahimi, Briggs et al. 1990). Une saccade a une amplitude naturelle de 15 ° ou moins (Bahill, Adler et al. 1975) ce qui signifie qu'à une intersection en forme de T, les saccades de l'œil sont généralement insuffisantes pour extraire toute l'information pertinente. Les mouvements de tête sont donc nécessaires et utiles pour l'acquisition d'informations supplémentaires au niveau des rétroviseurs et des angles morts d'un véhicule. Des résultats préliminaires ont permis d'observer que les personnes âgées omettent régulièrement de vérifier les angles morts et les rétroviseurs du véhicule avant d'effectuer un changement de voie. La perte d'amplitude articulaire des

mouvements céphaliques ne semblent pas en être la cause puisque dans certains contextes les mouvements de rotation sont présents alors qu'ils le sont beaucoup moins quand la charge cognitive est plus importante (Teasdale, Lavallières et al. 2007).

Un conducteur ayant une réduction du champ de vision et de l'amplitude des mouvements céphaliques va devoir compenser d'une façon ou d'une autre. Plusieurs possibilités s'offrent à lui. Il peut, par exemple, pivoter le torse, la tête ou les yeux à de plus grandes amplitudes. Toutefois, il y a plusieurs limitations à ces compensations. Premièrement, la ceinture de sécurité restreint les mouvements de rotation du torse. Deuxièmement, les conducteurs portant des verres correcteurs vont dans certains cas extrêmes devoir tourner les yeux en dehors des limites permises par ceux-ci. Un troisième comportement compensatoire possible est d'effectuer des mouvements oculaires plus rapides. Toutefois, cette réponse est difficilement réalisable pour les personnes âgées comme l'indiquent les résultats de Carter et al. (1983) qui montrent une augmentation des latences des mouvements oculaires pour les personnes âgées. L'une des méthodes enseignées pour palier à ces déficits consiste à regarder dans les rétroviseurs à différents angles ce qui permet de minimiser l'amplitude de l'angle mort et d'ainsi minimiser l'amplitude des rotations céphaliques réalisées. Malheureusement, très peu de données tangibles permettent de conclure à l'efficacité de cette méthode. Il semble donc que toutes ces alternatives soient inefficaces pour compenser une réduction du champ visuel et une perte d'amplitude des mouvements céphaliques.

1.2.4.2 Technologie et conduite

Il y a près de 30 ans, Ogden, Levine et Eisner (1979) ont commencé un article de la façon suivante "As technology and resulting system complexity increased, practical questions concerning the human operator's capability to handle various system demands have arisen. Research efforts addressing this question have come to be identified as studies concerned with operator workload". À cette époque, ils traitaient de l'organisation du travail des chaînes de montage suite à l'arrivée de nouvelles technologies maximisant les interactions entre les travailleurs et les machines sans pour autant augmenter le nombre d'erreurs à un niveau considéré comme inacceptable. Trente ans plus tard, nous pourrions réutiliser exactement le même texte mais cette fois pour parler de la conduite d'une automobile. Bien

que les premières sources de distraction en conduite soient apparues en même temps que l'automobile, l'avènement des technologies a augmenté les sources de distraction et affecté le monde de la sécurité routière. Pratiquement tous les véhicules vendus au cours des vingt dernières années étaient équipés d'un lecteur-cassette ou d'un lecteur cd-rom et d'une radio. De nos jours, en plus de la radio et du lecteur cd-rom, la majorité des nouveaux véhicules sont équipés ou offrent en option un système intégré de positionnement par satellite (GPS), un système anticollision, une prise pour lecteur mp3, un lecteur DVD pour les passagers et une infinité d'appareils que la prolifération des systèmes sans-fils permet d'intégrer dans le véhicule. Évidemment, chacun de ces équipements ajoute une charge attentionnelle continue ou périodique sur le conducteur en nécessitant des interactions manuelles, visuelles ou auditives.

L'évaluation de la charge attentionnelle en conduite concerne plusieurs aspects de la sécurité routière comme la certification des conducteurs, l'évaluation des conducteurs actifs, l'aménagement des bordures de routes, l'évaluation de l'efficacité des stratégies de conduite et le design et la conception des véhicules. Le niveau de vigilance et le maintien de la performance sont également directement liés à la charge attentionnelle et aux ressources disponibles du conducteur. Quand la charge dépasse les ressources, il y a un risque plus important d'accident. En conduite, le stimulus primaire se trouve sur la route à l'avant du véhicule alors que la majorité des distractions proviennent de l'intérieur du véhicule concurrençant pour les ressources visuelles et attentionnelles restantes. Un problème risque de survenir quand le conducteur choisit de surveiller plusieurs stimuli secondaires plutôt que la tâche primaire (Sodhi, Reimer et al. 2002). Hancock & Warn (1989) ont proposé trois états de performance qui reflètent très bien ce qui semble se produire au volant : normal et stable, de passage et surcharge. L'état normal peut être illustré par des conditions de conduite paisible n'offrant aucun challenge particulier. L'état de passage correspond à la transition entre une situation paisible de conduite et une situation offrant un bon challenge comme par exemple l'arrivée à une intersection ou une augmentation soudaine de la densité de trafic. Finalement, l'état de surcharge correspond à une situation nécessitant plus de ressources que la situation de passage. Le niveau de performance diminue rapidement dans cet état.

1.2.4.3 Prévalence du cellulaire et réglementation

La section ci-dessous ainsi que les deux suivantes portent en grande partie sur le téléphone cellulaire qui est sans contredit le plus répandu et le plus étudié des appareils sans fil. Cette proportion peut sembler disproportionnée puisque aucune des études réalisées dans le cadre de cette thèse traite du téléphone cellulaire. Toutefois, je me suis intéressé à la charge cognitive des conducteurs et il m'apparaît impossible de traiter de ces aspects sans aborder les nombreuses études réalisées sur la thématique téléphone cellulaire et conduite.

En 2006, deux ménages canadiens sur trois possédaient au moins un téléphone cellulaire (Statistique Canada 2006). Le Québec accuse d'ailleurs un recul à ce niveau se classant avant-dernier au niveau canadien alors que seulement 57.9 % de ses ménages en possèdent un. Il y a dix ans, une étude (Goodman, Bents et al. 1997) réalisée pour le NHTSA révélait que 85 % des propriétaires de cellulaire l'utilisait occasionnellement en conduisant et que 27 % de ceux-ci l'employaient pour plus de 50 % du trajet. En Finlande, une série de sondages réalisés auprès des conducteurs a montré une augmentation importante de l'utilisation du téléphone cellulaire au volant. En 1998, 56 % des propriétaires de téléphone cellulaire l'utilisaient en conduisant comparativement à 68 % en 1999 (Lamble, Rajalin et al. 2002) et à 81 % en 2002 (Poysti, Rajalin et al. 2005). Au Canada, 20 % des conducteurs ont rapporté avoir utilisé le téléphone cellulaire au volant dans la semaine précédant leur participation au sondage (Berneiss, Simpson et al. 2002). En Suède, un important sondage s'échelonnant d'avril 1998 à mars 2002 a montré que près de 73 % des conducteurs avaient accès à un téléphone cellulaire en conduisant en 2001 contre 55 % en 1998. De plus, seulement 30 % des conducteurs âgés de 75 à 84 ans avaient accès à un téléphone au volant contre 90 % pour les conducteurs de moins de 25 ans. Parmi tous les conducteurs ayant accès à un téléphone, 35 % des conducteurs de moins de 25 ans l'utilisaient contre moins de 10 % pour les 75 ans et plus. Il y a cependant deux fois plus (70 %) de conducteurs qui avouent laisser leur téléphone actif tout en conduisant dont 85 % des jeunes conducteurs et 45% des conducteurs âgés (Thulin and Gustafsson 2004). En 2005, suite à la compilation de sondages et d'interviews téléphoniques, le NHTSA (Glassbrenner 2005) a estimé que le pourcentage réel de conducteurs utilisant un téléphone cellulaire à tout instant de la journée était d'environ 10 %.

Malgré la proportion importante de conducteurs utilisant leur téléphone au volant, une part importante de la population semble en faveur de la mise en place de restrictions. Peu importe le pays où le sondage a eu lieu, environ 50 % de la population est en faveur de restrictions au niveau du téléphone cellulaire à main et 25 à 31 % le sont pour tous les types de téléphone cellulaire (Berneiss, Simpson et al. 2002; Lambie, Rajalin et al. 2002; Thulin and Gustafsson 2004). Au Canada, l'usage du téléphone cellulaire au volant est sous la responsabilité des provinces alors que la conception et l'installation d'équipement d'origine peuvent être réglementées et contrôlées par les Normes de Sécurité des Véhicules Automobiles du Canada (NSVAC). Au Québec, le gouvernement a décidé d'interdire le téléphone cellulaire tenu en main à partir d'avril 2008. Cette décision est quelque peu surprenante compte tenu que la table québécoise sur la sécurité routière avait proposé en 2007 l'introduction d'une législation visant à contrôler l'usage de tous types de téléphone cellulaire au volant. Le politique du gouvernement du Québec est similaire à celle mise en place par la province de Terre-Neuve en 2003. Celle-ci permet l'utilisation du téléphone mains libres, mais interdit le téléphone à main. Au cours des deux dernières années, le Manitoba, l'Ontario, la Nouvelle-Écosse et l'île-du-Prince-Édouard ont adopté la même politique. La Colombie-Britannique devrait suivre en 2010. Aux États-Unis, les états du Connecticut, du New Jersey, de New York et le district de Washington ont adopté le même genre de réglementation. L'état de Californie a suivi en juillet 2008. Sur la scène internationale, une cinquantaine de pays ont réglementé l'usage du téléphone cellulaire, généralement en interdisant ou limitant l'usage du téléphone cellulaire à main (McCartt and Hellinga 2007). Le Japon, la Grèce et le Brésil ont complètement banni tous types de téléphone au volant alors que la majorité des pays de l'Union européenne ont interdit l'utilisation du téléphone à main. Bien qu'elles soient efficaces à court terme, ces mesures ne traversent pas toujours l'épreuve du temps. Dans l'état de New York, une réduction de 50 % de l'utilisation des téléphones à main a été observée suite à l'adoption de la réglementation. Un an plus tard, le niveau d'utilisation était toutefois revenu à son niveau initial. Dans le district de Washington, les choses se sont passées autrement. À court terme, une réduction de 50 % a été observée et celle-ci était toujours maintenue 15 mois après la mise en application de la réglementation (McCartt, Hellinga et al. 2006; McCartt and Hellinga 2007). Selon McCartt et Hellinga (2007), plusieurs facteurs permettent d'expliquer

la divergence des résultats obtenus entre l'état de New York et le district de Washington. Premièrement, le corps policier du district de Washington est reconnu pour faire appliquer la réglementation sans compromis. Ils ont d'ailleurs donné 9817 contraventions pour usage du téléphone au volant dans les 14 mois qui ont suivi la mise en application de la réglementation. Ce nombre représente environ 8 % de l'ensemble des contraventions de la circulation émises dans le district. Deuxièmement, les médias ont porté beaucoup d'intérêt à la problématique du téléphone au volant dans les mois qui ont suivi la mise en application de la réglementation. Cette publicité gratuite a certainement joué un rôle de renforcement auprès des conducteurs (McCartt and Hellinga 2007).

En Espagne, où le téléphone à main est interdit, Gras et al. (2007) ont rapporté qu'environ 60 % des gens utilisent le téléphone au volant pour faire ou répondre à un appel ou écrire ou lire un message texte (SMS : Short Message Service). Les SMS sont de courts messages qui peuvent être envoyés et reçus par téléphonie cellulaire. Ils ont l'avantage d'être peu coûteux et le receveur n'a pas besoin d'être disponible pour les recevoir. Le danger avec ce nouveau service qui gagne beaucoup de popularité auprès des jeunes est qu'il requiert beaucoup plus d'attention visuelle qu'un appel téléphonique traditionnel. Pour cette raison, cette technologie a le potentiel de causer un niveau de distraction plus élevé encore que le téléphone cellulaire. Globalement, 57.9 % des conducteurs ont rapporté utiliser le téléphone au volant pour parler, 26.9 % pour utiliser les SMS et 23.7 % pour les appels et les SMS. Seulement 14.3 % des conducteurs qui utilisent le téléphone en conduisant se servent d'un système mains libres. C'est donc dire que plusieurs automobilistes contreviennent à la loi espagnole.

1.2.4.4 Modification du risque : Étude épidémiologique

Tous les appareils technologiques procurent des bénéfices directs ou indirects au conducteur, mais le risque associé à leur utilisation et à l'augmentation de la charge attentionnelle qui en découle ne permet pas toujours d'équilibrer l'équation. Parmi tous les répondants à un sondage suédois, 48 % des conducteurs ont mentionné avoir déjà été tellement concentrés sur une conversation téléphonique qu'ils ont commis des erreurs de conduite, sans conséquence importante, incluant d'avoir manqué une sortie, d'avoir perdu le contrôle du véhicule, d'avoir maintenu une vitesse trop basse ou trop haute par rapport

au débit de la circulation, etc. Les jeunes conducteurs (18-24 ans) ont été 62 % à mentionner avoir commis ces incidents contre 24 % pour les 65-74 ans (Thulin and Gustafsson 2004).

Il semble que plusieurs conducteurs prennent des précautions en conduisant. Toujours selon le sondage suédois (Thulin and Gustafsson 2004), 25 % des conducteurs mentionnent ne jamais effectuer d'appels et 10 % prétendent même ne jamais répondre en conduisant. Les femmes répondent dans une proportion moins importante que les hommes et les conducteurs âgés répondent dans une proportion moins importante que les jeunes conducteurs. Parmi les conducteurs qui avouent effectuer des appels en conduisant, certains adoptent tout de même certaines précautions. L'arrêt du véhicule est mentionné par 30 % des conducteurs, la diminution de la vitesse par 55 %, la sélection d'un moment de densité de trafic peu importante par 65 % et la sélection d'un moment où le trafic est complètement immobilisé par 55 %. Parmi les conducteurs qui mentionnent répondre au téléphone alors qu'ils conduisent, 70 % minimisent la conversation, 60 % ralentissent, 40 % demandent à un passager de répondre, 30% demandent de rappeler plus tard et 25 % rangent la voiture sur l'accotement. De plus, une proportion importante de conducteurs évite d'utiliser leur téléphone à la noirceur (25 %). Ce pourcentage est deux fois plus important pour les conducteurs de plus de 65 ans (Thulin and Gustafsson 2004). Laberge-Nadeau et Maag (2003) ont également des résultats similaires au Québec où 25 % de tous les conducteurs affirment immobiliser leur véhicule pour faire un appel, 50 % mentionnent réduire leur vitesse et presque 50 % préfèrent attendre un feu rouge.

Malgré les précautions prises par les conducteurs lors de l'utilisation d'un téléphone cellulaire, il semble que celles-ci ne soient pas suffisantes et efficaces. Redelmeier et Tibshirani (1997) ont étudié le dossier de 699 conducteurs possédant un téléphone cellulaire et impliqué dans un accident de la route. Les résultats montrent que le risque d'accident est 4 fois plus important lorsque le téléphone est utilisé et que ce risque demeure élevé même après la conversation. Des résultats similaires ont été obtenus pour tous les groupes d'âge, pour tous les niveaux d'expérience et peu importe le type de téléphone. Toutefois, la méthode employée dans cette étude a été contestée et des augmentations beaucoup plus conservatrices ont été avancées récemment (Thulin and Gustafsson 2004).

Laberge-Nadeau et Maag (2003) ont plutôt mesuré un risque augmenté de 38 % lorsqu'un téléphone cellulaire est utilisé tout en conduisant. Ce risque augmenté correspond au risque d'être impliqué dans un accident de la route causant des dommages corporels et/ou matériels. Ces résultats ont été obtenus suite à la compilation de 175 000 questionnaires complétés par des conducteurs possédant un permis de conduire au Québec.

Goodman et al. (1999) ont fait remarquer que le sentiment de sécurité associé à l'utilisation d'un téléphone mains libres par rapport à un téléphone à main peut entraîner une augmentation de l'usage du téléphone au volant. L'augmentation de la sécurité perçue pourrait également convaincre des non-utilisateurs du téléphone au volant de le faire. Globalement, le risque d'accident de la route pourrait subir une hausse substantielle. Ces craintes se sont avérées fondées dans au moins deux études (Sullman and Baas 2004; Gras, Cunill et al. 2007). Celles-ci ont observé que les utilisateurs de téléphone mains libres l'utilisaient plus fréquemment en conduisant que les utilisateurs de téléphones à main. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de déterminer si le téléphone mains libres encourage son usage ou si les conducteurs qui parlent plus fréquemment au téléphone en conduisant sont plus susceptibles de s'en procurer un.

Les conducteurs invoquent également des avantages à la présence d'un cellulaire dans l'habitacle de leur voiture. Toujours dans le cadre du sondage suédois de 2004 (Thulin and Gustafsson 2004), les automobilistes ont mentionné, comme avantages, qu'ils pouvaient être contacté et contacter les autres à tout moment, qu'ils pouvaient appeler les services d'urgence au besoin, qu'ils pouvaient appeler et parler à leurs amis, qu'ils pouvaient travailler, qu'ils pouvaient effectuer des tâches personnelles tout en conduisant et qu'ils pouvaient parler avec une autre personne pour rester éveillés. L'avantage principal semble lié à la sécurité, à la capacité des automobilistes d'appeler les services d'urgences au besoin. Toujours dans ce même sondage, 16 % des conducteurs actifs ont répondu avoir été témoin d'un accident au cours des années 2001 ou 2002. Parmi tous ces témoins, 75 % était en véhicule au moment de l'incident et 36 % de ceux-ci ont utilisé leur téléphone cellulaire pour appeler les services d'urgence.

1.2.4.5 Modification du risque : Études expérimentales

Un nombre important d'études expérimentales ont été réalisées sur la thématique conduite, attention et téléphonie cellulaire au cours des dernières années. L'essor des téléphones cellulaires en est évidemment la cause même si de nombreuses autres distractions au volant ont également été étudiées. La force des études expérimentales en sécurité routière est qu'elles permettent de bien définir la tâche principale de conduite et s'il y a lieu la tâche secondaire. Ainsi, les effets des distractions peuvent être évalués rigoureusement.

Comme mentionné précédemment, le téléphone cellulaire est le plus répandu des appareils sans fil utilisés par les conducteurs de véhicules automobiles et le nombre élevé d'études traitant de cette problématique le reflète très bien. La compétition visuelle, physique et cognitive entre la conduite et l'utilisation du téléphone peuvent potentiellement augmenter le risque d'accident lors de son utilisation au volant. Faire ou recevoir un appel téléphonique nécessite que le conducteur quitte temporairement la route des yeux et qu'une main lâche le volant pour manipuler le téléphone.

Différentes questions de recherche ont été posées. Les premières études se sont particulièrement intéressées à la charge cognitive associée à la composition et aux conversations de tous les types incluant celles survenant avec les passagers du véhicule. La composition d'un numéro de téléphone a particulièrement attiré l'attention puisque celle-ci était considérée comme la tâche nécessitant le plus de ressources cognitives. Cette croyance est encore bien répandue au niveau des organismes responsables de la réglementation en sécurité routière comme en témoigne la législation en vigueur dans plusieurs pays permettant l'utilisation du téléphone mains libres, mais interdisant le téléphone à main. Par la suite, les types de téléphones et de conversations ont été étudiés (téléphone cellulaire mains libres à l'oreille, mains libres intégrées au véhicule et à main) et des liens ont été établis avec différents aspects de la conduite. Par exemple, les interactions entre le type de transmission et le type de téléphone ont été étudiées. Finalement, des comparaisons avec différentes tâches comme la manipulation de la radio et de la ventilation ont été effectuées. Certains auteurs ont même comparé statistiquement et expérimentalement les effets de l'alcool avec ceux du téléphone cellulaire pour permettre la comparaison avec une

référence tangible. Pour toutes ces problématiques, différentes méthodologies (simulateur, circuit routier et conduite naturelle) de recherche ont été utilisées.

Plusieurs études (Brookhuis, de Vries et al. 1991; McKnight and McKnight 1993; Alm and Nilsson 1995; Matthews, Legg et al. 2003) ont utilisé les évaluations subjectives pour mesurer la charge cognitive associée à l'utilisation des différents types de téléphone cellulaire sur la conduite. Globalement, toutes ses études ont observé une augmentation de la charge cognitive avec l'utilisation du téléphone cellulaire. De plus, deux de ces études (Brookhuis, de Vries et al. 1991; Matthews, Legg et al. 2003) ont tenté de différencier les types de téléphone cellulaire. Dans le cas de Brookhuis et al. (1991), aucune différence significative n'a été observée entre le téléphone à main et le téléphone mains libres possiblement en raison de la sensibilité de l'échelle analogue utilisée pour l'évaluation de la charge attentionnelle. Par contre, Matthews et al. (2003) ont évalué l'effet de trois types de téléphones cellulaires disponibles commercialement soit le téléphone à main, le téléphone mains libres avec micro et haut-parleur intégré au véhicule et le téléphone mains libres avec micro et haut-parleur portés à l'oreille par le participant et ont obtenu des différences significatives au test Nasa-TLX. Les participants devaient conduire sur l'autoroute tout en réalisant le test de rime modifié par l'intermédiaire des trois types de téléphone. Ce test consiste à faire entendre des mots à phonétique similaire (p. ex., hanche et planche) au participant qui doit les répéter. La fréquence de présentation des mots était de 15 mots/min. Le pourcentage de bonne réponse est considéré comme un indice de l'intelligibilité de la conversation. Les conversations réalisées avec le téléphone à main et le téléphone avec micro et haut-parleur au niveau de l'oreille ont été plus intelligibles que le téléphone avec micro et haut-parleurs intégrés au véhicule. Ce dernier a également été celui sollicitant la plus importante charge cognitive suivi du téléphone à main et du téléphone avec micro et haut-parleurs au niveau de l'oreille. Ce type de téléphone avec micro et haut-parleurs intégrés au véhicule serait moins efficace que les deux autres en raison du bruit externe (circulation, moteur, etc.) rendant l'écoute fastidieuse et nécessitant un niveau de concentration élevé pour entendre et comprendre son interlocuteur.

Lors d'une étude sur route réalisée par Transport Canada, Harbluk et al. (2002) ont évalué l'impact d'une distraction sur les comportements visuels et le contrôle du véhicule. La

distraction consistait en une conversation sur téléphone cellulaire mains libres. Chacun des participants devait parcourir le circuit de 8 km dans trois niveaux de complexité cognitive différents : sans tâche, calcul simple et calcul complexe. Dans les 2 conditions où la charge cognitive était plus élevée, les participants ont montré moins de saccades oculaires, ils ont passé plus de temps à regarder au centre et moins en périphérie à droite (vision tunnelaire) et ils ont effectué moins de fixations sur les instruments et le rétroviseur arrière. De plus, les participants ont montré un nombre plus élevé de freinages brusques alors qu'ils effectuaient une tâche complexe répliquant ce que Hancock et al. (1999) avaient observé en présence d'une distraction. Des changements au niveau de l'évaluation subjective de travail réalisée avec le NASA-TLX ont également été observés entre les trois niveaux de charge cognitive. Les auteurs ont conclu que même en utilisant un téléphone mains libres, des changements importants au niveau du comportement visuel des conducteurs et du contrôle du véhicule étaient présents. Aucune comparaison avec le téléphone à main n'a toutefois été effectuée dans cette étude.

Strayer et Drew (2003) ont également observé les comportements oculaires de conducteurs en simulateur. Dans ce cas-ci, les participants devaient parcourir le scénario de conduite dans deux conditions expérimentales : une condition de conduite simple et une condition de conduite complexe nécessitant de converser au téléphone cellulaire mains libres. Pour les deux conditions, des mots affichés sur des panneaux réclames étaient présentés à différents endroits des scénarios de conduite. Une tâche de reconnaissance des mots et l'analyse des comportements visuels étaient effectuées à la fin du scénario. Contrairement à Harbluk et al. (2002), aucune différence significative n'a été observée au niveau des comportements oculaires. Dans les deux conditions, les participants ont fixé le même nombre de panneaux réclames et la durée de ces fixations était semblable. Par contre, la tâche de reconnaissance des mots a montré des résultats intéressants. Les mots ont été significativement plus souvent et correctement reconnus dans la condition simple de conduite faisant dire aux auteurs que la conversation au téléphone cellulaire n'influçait pas les comportements oculaires des conducteurs, mais plutôt l'attention portée à l'environnement visuel. Il semble que les conducteurs ont souvent omis de voir même après avoir regardé l'environnement parce que l'attention était portée sur la conversation. Quand les conducteurs discutaient au téléphone cellulaire, l'attention dédiée au traitement de l'information de l'environnement

de conduite nécessaire pour une conduite sécuritaire se déplaçait vers la conversation téléphonique. Les auteurs ont suggéré que les données étaient en accord avec la théorie de la cécité attentionnelle, c'est-à-dire que la conversation au téléphone cellulaire modifie la performance de conduite en détournant l'attention de l'environnement externe à un contexte interne engageant. La principale critique qu'il est possible de faire à cette étude concerne l'impertinence des informations se trouvant sur les panneaux réclames pour la conduite automobile. Il peut sembler adéquat de ne pas traiter ces informations en situation de charge attentionnelle élevée et de prioriser des informations pertinentes. Toutefois, la durée des fixations qui est considérée comme un indice de la quantité d'informations à extraire a été similaire pour les deux conditions. De plus, Strayer et Johnston (2001) ont observé que les conducteurs omettaient plus souvent de se conformer à la signalisation routière lors d'une conversation au téléphone cellulaire que lors d'une tâche simple de conduite. Ce résultat tend à démontrer que peu importe que l'information présentée soit pertinente ou non pour la sécurité routière, le téléphone cellulaire a un effet de cécité attentionnelle. Les comportements oculaires n'ont pas été mesurés dans cette dernière étude. Ils auraient permis d'identifier si les conducteurs avaient regardé la signalisation sans l'interpréter ou s'ils avaient également omis de regarder.

Liu & Lee (Liu and Lee 2006) ont étudié la charge attentionnelle associée à une conversation sur téléphone cellulaire mains libres lors de conduite urbaine et sur autoroute. Les résultats suggèrent que la conduite en ville est associée à une augmentation de la charge attentionnelle et ce, même si la vitesse est réduite. Les temps de réponse aux questions posées par téléphone cellulaire ont augmenté significativement lors de la conduite urbaine par rapport à la conduite sur autoroute. Peu importe le type de route, lors d'une conversation au téléphone cellulaire, les conducteurs ont diminué leur vitesse (5.8 %) ce qui est généralement considéré comme une compensation survenant lorsque la charge cognitive est élevée. Gras et al. (2007) ont rapporté que les conducteurs utilisaient plus souvent leur téléphone en ville que sur l'autoroute, mais que le pourcentage de conducteurs à utiliser leur téléphone en ville était moins important que sur l'autoroute. Les participants à ce sondage ont également mentionné adopter des comportements compensatoires comme d'arrêter le véhicule ou de diminuer sa vitesse plus souvent en ville que sur l'autoroute.

Tornos et Bolling (2005) ont réalisé deux études en simulateur pour tenter de quantifier la charge attentionnelle associée à la composition et à la conversation sur téléphone à main et téléphone mains libres. Tous les sujets ont participé aux deux études et ont été évalués avec le téléphone mains libres ou le téléphone à main. Le scénario pour la condition conversation était d'une longueur de 70 km et les participants devaient réaliser 10 conversations au cours du scénario. La conversation consistait à réaliser des additions en série. Le scénario pour la condition composition était d'une longueur de 15 km et les participants devaient composer un numéro de téléphone à trois reprises au cours du scénario. Pour les deux expérimentations, une tâche de détection de cibles périphériques (TDCP) était réalisée simultanément. La TDCP consistait à faire allumer une cible parmi plusieurs autres distribuées sur un tableau d'affichage. La cible était allumée pour un maximum de deux secondes ou jusqu'à ce que le participant appuie sur un bouton pressoir indiquant la détection de la cible. La performance à la TDCP a été utilisée comme mesure de la charge attentionnelle. Les auteurs ont observé que la performance était affectée pour les tâches de composition et de conversation, peu importe le type de téléphone utilisé. L'augmentation moyenne du temps de réaction par rapport à la tâche de contrôle a été de 159 ms pour la conversation et de 270 ms pour la tâche de composition. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux types de téléphone ce qui signifie que peu importe le type utilisé, l'augmentation de la charge attentionnelle est similaire. De plus, l'utilisation du téléphone a amené une augmentation du nombre de stimulus manqué. Près de 13 % des essais ont été manqués pour la tâche de conversation contre plus de 24 % pour la tâche de composition. Encore une fois, les effets ont été similaires pour les deux types de téléphone. Les effets de la conversation et de la composition sur la performance de conduite ont également été étudiés. L'écart-type du déplacement latéral du véhicule a diminué de 1.3 cm lors de la tâche de conversation et augmenté de 6.5 cm lors de la tâche de composition. Une augmentation de la variabilité du déplacement latéral est généralement interprétée comme un comportement moins sécuritaire. La diminution associée à la conversation va dans le sens opposé des résultats obtenus par Haigney (2001) et elle est expliquée, par les auteurs, comme une compensation possible pour une augmentation de la charge ou une simple accentuation de la priorité accordée au contrôle du volant. Une diminution de la vitesse du véhicule a également été observée pour les deux tâches et les

deux types de téléphone. Pour la tâche de conversation, le téléphone à main a causé la plus grande diminution de vitesse observée. Par contre, pour la tâche de composition, c'est le téléphone à main qui a provoqué la plus grande diminution de vitesse. Puisqu'une diminution de vitesse est généralement perçue comme un mécanisme de compensation suite à une augmentation de la charge attentionnelle, ce résultat peut paraître surprenant. Toutefois, comme expliqué par les auteurs, la composition sur un téléphone à main peut facilement se faire dans le champ de vision du conducteur qui n'a qu'à prendre le téléphone, l'amener au niveau du volant et composer le numéro. Cette stratégie permet de diminuer considérablement la durée des fixations oculaires hors route. Finalement, la prévalence des conducteurs réalisant un arrêt complet à un stop s'est avérée significativement moins importante pour les utilisateurs de téléphones cellulaires à main comparativement aux autres conducteurs (Strayer, Drews et al. 2006).

Patten et al. (2004) ont également utilisé une tâche secondaire de détection de cibles périphériques (TDCP) pour quantifier la charge attentionnelle associée à deux modes de conversation (téléphones cellulaires mains libres et à main). Leur étude a toutefois été réalisée en situation réelle de conduite sur autoroute. La TDCP était réalisée en continu. Les cibles étaient allumées à toutes les 3 à 5 secondes pour un maximum de 2 secondes. De plus, les participants devaient répondre à quelques appels téléphoniques dans les deux modes téléphoniques. L'aller sur l'autoroute se faisant dans un mode et le retour dans l'autre. La tâche de conversation était divisée en deux niveaux : simple et complexe. La condition de référence consistait à conduire tout en réalisant la TDCP mais sans avoir à parler au téléphone. Peu importe le type de téléphone, une augmentation importante des temps de détection a été mesurée pour la tâche simple de conversation (12 %) et pour la tâche complexe (45 %). Aucune différence concernant le type de téléphone n'a été observée. Le pourcentage de cibles détectées a également diminué significativement lors des conversations téléphoniques (85 %) par rapport à la condition contrôle (96 %).

Hancock et al. (2003) ont évalué les effets d'une conversation au téléphone cellulaire sur la performance de conduite de conducteurs jeunes et âgés lors d'une manœuvre cruciale de conduite, en l'occurrence, le passage d'une intersection. Cette expérimentation incluait quarante-deux conducteurs actifs incluant un groupe de jeunes adultes (25-36 ans) et un

groupe de conducteurs âgés (55-65 ans) qui devaient conduire sur un circuit fermé comprenant une intersection. Chaque tour du circuit correspondait à un essai. Au total 24 essais devaient être effectués dans quatre conditions expérimentales différentes (lumière verte sans distraction, lumière verte avec distraction, lumière rouge sans distraction et lumière rouge avec distraction). La distraction survenait à l'approche de l'intersection. Suite à un bip sonore, le conducteur devait observer le chiffre apparaissant sur un téléphone cellulaire et appuyer sur une touche de ce même téléphone pour indiquer si le chiffre affiché correspondait à un chiffre préalablement présenté au conducteur. Pour la condition lumière verte, les participants devaient traverser l'intersection sans s'arrêter alors que pour la condition lumière rouge, il devait s'immobiliser le plus rapidement possible avant d'atteindre la ligne d'arrêt. Sans distraction, les participants ont réussi à s'arrêter (lorsque nécessaire) dans 94.64% des cas alors qu'avec la distraction ce pourcentage est descendu à 80.35 %. Les personnes âgées ont été les plus affectées par l'introduction de la distraction alors qu'elles se sont immobilisées pour 75 % des essais. L'analyse du temps de réaction du freinage (TRF) suite à l'apparition de la lumière rouge a également donné des résultats intéressants. Le TRF a augmenté avec la présence de la distraction. Une fois de plus, les personnes âgées ont été plus affectées que les jeunes conducteurs. Curieusement les participants se sont arrêtés plus près de la ligne d'arrêt dans la condition distraction, mais ont également appuyé plus fortement sur les freins pour y parvenir. Les auteurs interprètent ce comportement comme une réponse d'urgence des participants suite au constat d'un retard au niveau de l'apparition de la lumière rouge. La présence de la distraction semble affecter la marge de sécurité disponible et la performance de conduite. De plus, comme régulièrement montré dans la littérature traitant des personnes âgées, celles-ci sont disproportionnellement plus affectées par la présence d'une distraction et la réalisation d'une tâche complexe. Des effets d'apprentissage ont été observés dans cette étude ce qui laisse croire à une diminution des conséquences de la distraction sur la performance de conduite à mesure que la double tâche est maîtrisée. Toutefois, il pourrait également s'agir d'un effet d'apprentissage associé à une anticipation du stimulus plutôt qu'à une meilleure gestion des ressources attentionnelles. Des études supplémentaires pour vérifier et valider ces hypothèses sont toutefois nécessaires. Les auteurs ont également remarqué une grande hétérogénéité des résultats suggérant que la marge de sécurité pour chacun des participants

varie grandement d'un individu à l'autre. Ces résultats limitent les généralisations et incitent à la prudence au niveau de la réglementation et de l'évaluation des conducteurs jeunes et âgés.

Treffner et Barrett (2004) ont évalué l'influence du téléphone mains libres sur des facteurs biomécaniques et perceptuels qui sous-tendent la conduite automobile. Cette étude est importante et intéressante puisqu'elle incorpore des variables qui ont très peu été utilisées pour évaluer la performance des conducteurs. Leur expérimentation a été effectuée sur circuit-fermé avec un véhicule expérimental. Trois tâches de conduite ont été sélectionnées pour refléter les aspects essentiels de la conduite : la négociation d'un virage, la réalisation d'un freinage contrôlé et l'évitement d'un obstacle. Ces trois tâches étaient effectuées par les participants dans 4 niveaux de conversation (aucune conversation (condition contrôle) et conversation 1, 2 et 3). Globalement, le relâchement de l'accélérateur ainsi que le début du freinage à l'approche d'un virage ont été repoussés lors d'une conversation téléphonique. Lors des freinages contrôlés, le niveau de freinage a diminué et le style de freinage a été modifié. L'originalité de cette étude réside dans le fait qu'ils ont utilisé le temps restant avant l'impact («Time to contact») comme variable de la performance de conduite. Le temps restant avant l'impact est également connu comme la théorie de tau qui est en fait une mesure de l'expansion rétinienne permettant d'estimer le temps restant avant un impact. Il s'agit en fait d'un moyen utilisé par plusieurs organismes biologiques pour interagir avec l'environnement comme par exemple un oiseau qui effectue une extension des pattes à l'instant exact où il veut se poser sur une branche (Bootsma and Oudejans 1993). Dans une étude précédente, Treffner et Barrett (2002) ont montré que les informations de tau pouvaient être exploitées dans des conditions réelles de conduite comme pour immobiliser son véhicule au bon endroit et dans les temps à l'arrière d'un autre véhicule arrêté à une intersection. Plus intéressant encore, ils ont montré que les conducteurs initiaient le freinage du véhicule à un temps avant l'impact d'environ 5 secondes peu importe la vitesse d'approche du véhicule. La première dérivée de tau (tau-dot) peut également être utilisée comme indicateur du type de contact à venir (Lee 1976). Un tau-dot supérieur à 0.5 entraîne un contact important puisqu'une quantité importante d'énergie cinétique est toujours présente à l'impact. Un tau-dot inférieur à 0.5 résulte en un arrêt complet avant l'impact. Finalement, un tau-dot égal à 0.5 est considéré comme le

freinage idéal avec une décélération graduelle où l'énergie cinétique sera complètement dissipée au moment de l'arrêt complet. Les résultats obtenus avec les variables tau et tau-dot sont intéressants. Les valeurs instantanées de tau au moment où le freinage était initialisé à l'approche d'une courbe étaient moins importantes pour les 3 conditions de conversation que pour la condition contrôle. Ainsi, au moment où le freinage a été initié, les conducteurs étaient temporellement plus près de la courbe dans les conditions conversations que dans la condition contrôle. Pour la condition de freinage contrôlé, uniquement le type de freinage (tau-dot) s'est avéré significatif. La valeur du tau-dot mesurée pour les conditions conversations était de 0.53 ce qui correspond à un impact important avec la voiture immobilisée. Il est important de rappeler que les valeurs de tau et de tau-dot sont des mesures instantanées prises à des moments précis. Comme aucune collision n'est survenue dans cette expérimentation, la décélération suivant le début de l'activation du frein a nécessairement été plus importante pour permettre un arrêt dans les limites de distance. Les auteurs ont suggéré comme interprétation que les conducteurs en conversation n'avaient pas suffisamment réduit leur vitesse à l'approche de la courbe et qu'ils s'étaient adaptés en décélérant plus rapidement par la suite. Le freinage a donc été plus brusque et agressif dans les conditions conversations que dans la condition contrôle. Contrairement à certains auteurs (Nunes and Recarte 2002; Recarte and Nunes 2003), la complexité de la conversation n'a pas affecté la tâche de conduite dans cette étude. Les auteurs mentionnent à cet effet que le niveau des conversations est possiblement l'une des raisons et que des efforts considérables en recherche devront être mis sur le développement de méthodologies où les conversations utilisées seront à la fois naturelles et quantifiables. Finalement, les auteurs mentionnent que leur étude montre que le téléphone cellulaire compromet l'efficacité des conducteurs et montre plus particulièrement une réduction de la sensibilité d'une des formes les plus basales de perception-action en l'occurrence tau et tau-dot.

Les effets de la composition d'un numéro et des conversations au téléphone cellulaire qu'il soit à main ou mains libres sont bien documentés et bien réels. Toutefois, l'importance de ceux-ci et les comparaisons par rapport à d'autres conditions se font plutôt rares dans la littérature. Pour tenter de répondre à cette interrogation, Strayer et al. (2006) ont soumis les participants à différentes conditions expérimentales incluant la conversation avec un

téléphone cellulaire à main et sans main et la consommation d'alcool à la limite de la légalité (0.08 %). Il va sans dire que cette expérimentation a été réalisée en simulateur de conduite. La comparaison entre la conduite sous l'influence de l'alcool et l'utilisation du téléphone cellulaire est intéressante puisque Redelmeier et Tibshirani (1997) avaient estimé que le risque relatif d'être impliqué dans un accident de la route lors de l'utilisation du téléphone cellulaire était similaire à celui de conduire avec un taux d'alcoolémie de 0.08 %. Les résultats de Strayer et al. (2006) concernant l'utilisation du téléphone cellulaire vont dans le même sens que la majorité de la littérature sur le sujet. Peu importe le type de téléphone utilisé, l'utilisation du téléphone cellulaire affecte négativement la conduite même si la manipulation du téléphone et la composition sont enlevées. D'ailleurs, la durée d'une conversation est souvent beaucoup plus longue que la composition, le risque en est donc augmenté. La comparaison des conditions téléphone cellulaire et alcool a toutefois amené des résultats surprenants. Sous l'influence de l'alcool, les participants ont montré une conduite plus agressive, ils ont appliqué plus fortement sur les freins et ils ont suivi le véhicule les précédant de plus proche. Dans la condition conversation au téléphone cellulaire, les participants ont été impliqués dans plus de collisions par l'arrière, ils ont pris plus de temps à retrouver leur vitesse initiale suite à un freinage brusque, ils ont augmenté la distance avec le véhicule devant eux et ils ont diminué leur vitesse pour compenser une augmentation du temps de réaction. Après avoir contrôlé pour les difficultés de la conduite et la durée de chacune des tâches, ils semblent que les conducteurs soient plus affectés (plus d'accidents et des comportements de conduite moins adaptatifs) par la conduite en conversant au téléphone que par une intoxication à l'alcool à 0.08 %. Dans le même ordre d'idée, la compagnie d'assurance Direct Line Motor (2002) a effectué une étude en simulateur pour estimer les effets des différents types de téléphones cellulaires et de la consommation d'alcool sur le temps de réaction en conduite. Globalement, la performance de conduite a été réduite pour les conducteurs sous l'effet de l'alcool (80 mg/100 ml) mais celle-ci demeurait supérieure aux deux conditions de conversations au téléphone cellulaire mains libres et à main. Le temps de réaction des conducteurs lors de la condition téléphone à main était, en moyenne, 30 % plus lent que la condition alcool et près de 50 % plus lent que la condition contrôle. Les auteurs ont estimé qu'à une vitesse de 70 km/h, les différences observées au niveau des temps de réaction équivalaient à une distance de

freinage de 31 m pour la condition contrôle, 35 m pour la condition alcool, 39 m pour la condition téléphone mains libres et 45 m pour la condition téléphone à main. De plus, les conducteurs ont omis de respecter la signalisation plus souvent dans les conditions conversations que dans les deux autres conditions.

Le lien entre le téléphone cellulaire et la performance de conduite a été établi à de nombreuses reprises tant en conduite réelle qu'en simulateur. Les utilisateurs du téléphone cellulaire au volant montrent des comportements de freinage différents (Hancock, Lesch et al. 2003) et des temps de réaction plus longs aux événements soudains (Brookhuis, De Waard et al. 1994; Alm and Nilsson 1995), conduisent plus lentement (Brookhuis, de Vries et al. 1991; Alm and Nilsson 1994; Haigney, Taylor et al. 2000; Patten, Kircher et al. 2004) et suivent de plus près les véhicules les précédant (Haigney, Taylor et al. 2000). Beede et Kass (2006) ont fait une étude intéressante qui a regroupé plusieurs variables de la performance de conduite. L'objectif de leur étude était d'évaluer les effets d'une conversation au téléphone et/ou d'une tâche de détection de cible (attention partagée) sur différents aspects de la performance de conduite. L'étude a été réalisée sur simulateur de conduite et la conversation téléphonique simulée était effectuée sur un appareil sans fil. La tâche d'attention partagée consistait à appuyer sur un bouton presseur dès qu'un losange apparaissait dans l'un des deux coins supérieurs de la scène avant. Ce losange pouvait apparaître à tout instant de la simulation. Lors de la tâche de conversation, le participant devait répondre à des questions préenregistrées. L'étude comportait 4 conditions expérimentales (conversation - tâche de détection, sans conversation - tâche de détection, conversation - sans tâche de détection, sans conversation - sans tâche de détection). Dans chacune des quatre conditions, un signe d'arrêt pouvait apparaître soudainement dans le centre de l'écran pour simuler une situation d'urgence. À ce moment, le participant devait immobiliser le véhicule le plus rapidement possible. Les différentes conditions étaient contrebalancées au travers des sujets. Globalement, les conducteurs ont montré plus de violations au code de la route dans les conditions conversations. Nonobstant la condition expérimentale, le taux de succès à la tâche de détection de cible a été très bas (moins de 50 %) et aucune différence significative n'a été observée. La vitesse de conduite n'a pas été modifiée par la tâche de conversation, mais elle a légèrement augmenté lors de la tâche de détection de cible. Aucun effet principal n'a été observé par rapport à la variation de la

vitesse, mais une interaction l'a toutefois été. La vitesse a été la plus changeante quand aucune des deux tâches n'était présente. Les deux tâches de détection de cible ont eu le même effet et ont fait diminuer la variabilité des déplacements latéraux. Lors des conditions incluant une conversation, des détections de cible ou les deux, les participants ont changé moins souvent de voie. Lors d'une conversation, les participants ont mis plus de temps à repartir suite à l'arrêt à une intersection de type stop, mais ce résultat n'a pas été observé pour les intersections avec feux de circulation. À l'apparition soudaine du signe d'arrêt en plein centre de l'écran, les participants ont réagi plus rapidement lors d'une conversation téléphonique par 0.03 seconde. Cette différence est minime pour un temps de réaction, mais elle était significative. En conclusion, les auteurs mentionnent que même si les instructions étaient de prioriser la conduite, la tâche de conversation a clairement interféré sur celle-ci. Globalement, quand les participants étaient surchargés, il semble qu'ils ont écarté certaines tâches de conduite périphérique ce qui leur a permis d'accorder plus de ressources aux tâches principales de conduite et de conversation et de les compléter avec succès. Cette propension à ignorer certaines tâches de conduite périphérique s'est particulièrement reflétée dans cette étude par des violations du Code de la route, dont plusieurs omissions d'arrêt. La direction des résultats est parfois surprenante dans cette étude au niveau des paramètres de conduite, par exemple ceux concernant la variabilité de la trajectoire. Toutefois, l'important est de montrer qu'il y a des modifications puisqu'il est impossible de contrôler les stratégies de conduite adoptées pour stabiliser certaines variables prioritaires.

Bien que des différences au niveau de la charge attentionnelle requise en fonction du type de transmission ont été observées il y a déjà bien longtemps (Zeier 1979), peu d'études ont depuis étudié les effets associés à l'utilisation d'une transmission manuelle ou d'une transmission automatique. De plus, la majorité des études en conduite utilisent des véhicules ou simulateurs à transmission automatique pour diminuer l'effet d'apprentissage. Toutefois, il est envisageable de penser qu'une transmission de type manuel produise de l'interférence cognitive et physique avec le téléphone cellulaire et que cette interférence soit amplifiée pour certains types de téléphone cellulaire. À cet effet, Haigney et al. (2000) ont étudié les effets du type de transmission (manuelle et automatique) et du mode de conversation cellulaire (à main et mains libres) sur la performance de conduite. Les participants devaient parcourir aléatoirement 4 scénarios de conduite dans l'une des 4

conditions possibles (type de transmission x mode de conversation). Pour chacun des scénarios, les participants devaient répondre à trois appels téléphoniques. Lors de la tâche de conversation, les participants se faisaient présenter une série de deux lettres qui était suivie d'une affirmation à laquelle ils devaient répondre par vrai ou par faux. Les résultats de cette étude ont montré, une fois de plus, que l'usage d'un téléphone cellulaire affecte la performance de conduite (en simulateur). Aucune interaction n'a toutefois été observée entre le type de transmission et le type de conversation. Ce résultat est plutôt surprenant puisqu'il était envisageable que le téléphone cellulaire mains libres cause de l'interférence à l'utilisation d'une transmission manuelle et amplifie les différences. Toutefois, le scénario de conduite n'incluait aucune intersection et très peu de situations nécessitant des changements de vitesse ce qui minimisait le risque d'interférence physique et cognitive. Cette étude ne permet donc pas d'exclure qu'une transmission manuelle interfère avec les téléphones à main.

Il y a évidemment plusieurs autres systèmes internes au véhicule comme les systèmes de navigation et les systèmes anticollisions qui peuvent influencer la charge attentionnelle et créer des distractions. Lansdown et al. (2004) ont étudié l'impact de ces systèmes sur la performance de conduite et la charge attentionnelle, mais également l'effet de l'utilisation simultanée de plusieurs systèmes. La pertinence de cette étude provient du fait qu'il n'est pas rare en conduite d'avoir à exécuter ou répondre à plus d'une tâche secondaire à la fois tout en maintenant une conduite sécuritaire. La nature des tâches internes au véhicule varie en complexité. Certaines sont prévisibles comme le système de navigation qui donne ses indications à une distance constante d'une intersection alors que d'autres sont complètement imprévisibles comme la sonnerie d'un téléphone cellulaire. Un stimulus imprévisible de l'un de ses systèmes pourrait avoir pour effet de surprendre le conducteur et de lui faire commettre des erreurs de conduite. De plus, certains de ces stimuli peuvent requérir une réponse immédiate du conducteur alors que d'autres systèmes ou tâches peuvent être autorégulées par le conducteur. Évidemment, les tâches nécessitant une réponse rapide sont plus susceptibles de distraire le conducteur qu'une tâche autorégulée comme le changement de la fréquence de la radio. Un simulateur de conduite a été utilisé dans l'étude de Lansdown et al. (2004) qui incluait trois tâches secondaires différentes : une tâche de temps de réaction rythmé, une tâche de temps de réaction aléatoire et une tâche de

temps de réaction nécessitant une prise de décision. La condition contrôle consistait à conduire aussi normalement que possible. Les résultats montrent que l'interaction avec l'une ou l'autre des trois tâches secondaires a été associée à une réduction de la vitesse de conduite. Dans les trois conditions de tâche secondaire, les conducteurs ont suivi de plus près le véhicule devant eux et ont appuyé plus fort sur les freins. Ces deux comportements sont considérés comme des comportements à risque. Lors de la condition la plus complexe de la tâche secondaire ou une décision devait être prise, les expérimentateurs ont donné comme consignes d'apporter une plus grande attention aux stimuli provenant du côté droit du simulateur. Curieusement, les temps de réaction pour les stimuli du côté droit ont été plus rapides, mais le pourcentage de bonnes réponses a été supérieur pour les stimuli provenant du côté gauche. Ces résultats sont conformes au paradigme vitesse-précision, mais ne nécessitent pourtant aucun geste moteur.

1.2.4.6 Avantages et désavantages des méthodes expérimentales

Globalement, Hancock (2003) a mentionné que le problème central associé avec l'évaluation des conducteurs était que l'étude de la performance lors de situations non critiques rendait improbable l'observation des facettes les plus importantes du changement de la performance. L'hypothèse sous-jacente à cette affirmation est que la conduite est une tâche bien maîtrisée et que les conducteurs sont souvent très expérimentés. L'évaluation de conducteurs novices est généralement beaucoup plus facile puisque la simple présentation d'informations et d'instructions peut amener une surcharge cognitive immédiate. À mesure que les novices progressent, les habiletés s'automatisent ce qui procure un niveau important de cohérence des réponses suite à des stimuli. Suite à cette phase d'apprentissage, les conducteurs semblent en mesure de concilier la conduite avec des tâches secondaires comme la manipulation de la radio et la conversation avec un passager. Le conducteur semble adapter la tâche secondaire aux fluctuations de la tâche primaire de conduite. Dans des situations non-critiques, le conducteur peut réaliser des tâches secondaires tout en ayant une conduite sécuritaire. Toutefois, quand des situations d'urgence surviennent, deux phénomènes se présentent. Premièrement, la conduite normale procure peu d'entraînement aux manœuvres d'urgence et même les comportements bien appris et maîtrisés, qui semblaient même automatiques, ne sont plus aussi efficaces quand un nouveau stimulus se présente. Deuxièmement, un conducteur expérimenté peut adapter ses actions quand une

situation exigeante comme une intersection est perceptible. Par contre, si la situation est non-prévisible et qu'une distraction s'ajoute à la situation d'urgence, même les conducteurs expérimentés risquent de se faire prendre par surprise. Ainsi, toujours selon Hancock (2003), la conduite est constituée de longues situations non critiques et de moments cruciaux qui surviennent à quelques occasions pratiquement tous les jours. Ces moments cruciaux nécessitent toute l'attention du conducteur pour être réussis avec succès. Certaines de ces circonstances sont prévisibles (intersections complexes, heures de haute densité de circulation, etc.) alors que d'autres sont imprévisibles (un enfant qui traverse la rue sans regarder, un conducteur qui brûle un feu rouge, etc.). L'utilisation d'un téléphone cellulaire ou toutes autres distractions lors de moments cruciaux pourraient avoir des conséquences importantes alors qu'à d'autres instants, ces distractions n'affecteront que très peu la conduite.

Le manque d'une taxonomie entourant la technologie utilisée, les circuits routiers ou scénarios de conduite, les tâches expérimentales et les variables utilisées diminuent la validité et la fidélité des études en conduite (Haigney and Westerman 2001). Ce manque au niveau de la taxonomie limite la possibilité de reproduire une étude par d'autres chercheurs et rend difficile les synthèses et les comparaisons.

Peu importe la méthodologie utilisée, l'évaluation de la charge cognitive demeure un défi en conduite automobile. Selon Shinar (2005), l'un des principaux problèmes est que contrairement à la conduite réelle, le moment où survient la tâche secondaire est toujours déterminé par l'expérimentateur. De plus, le réalisme de la tâche secondaire utilisée fait souvent défaut. Par exemple, les tâches de conversation au cellulaire sont généralement peu émotives et comportent des tâches de calcul, des tâches de rappel d'informations ou des tâches simples ou complexes de vocabulaire (McCartt and Hellinga 2007). Dernièrement, les tâches téléphoniques utilisées étaient toutefois plus réalistes et naturelles. Par exemple, Shinar et al. (2005) ont orientés les conversations sur le travail, l'école, les habitudes sociales et les loisirs des participants pour engendrer des conversations avec un contenu émotif plus important. Pour cette raison et certaines autres concernant la problématique des méthodologies utilisées, Goodman et al. (1999), ont suggéré que la seule véritable façon d'évaluer les conséquences du téléphone cellulaire sur la conduite était d'installer des

systèmes autonomes d'enregistrement de données de type boîte noire dans la voiture de volontaires pour une longue période de temps et d'essayer par la suite d'associer l'utilisation du téléphone avec les données de conduite.

Une autre critique des différentes méthodologies utilisées concernent l'effet d'apprentissage (Shinar, Tractinsky et al. 2005). La courbe d'apprentissage est différente pour tous les individus et varie en fonction d'une multitude de facteurs. Si une période d'apprentissage insuffisante est allouée aux participants, les résultats ne refléteront pas les aptitudes réelles de ceux-ci. Cette critique est importante lors de l'utilisation d'un simulateur mais également lors d'une évaluation sur route impliquant l'utilisation d'un véhicule expérimental. McCartt et al. (2006) ont fait remarquer qu'il était souvent difficile de séparer l'effet technologie de l'effet nouveauté lors de l'utilisation de téléphones cellulaires mains-libres. Ces systèmes étant beaucoup moins courants, un effet d'apprentissage est inévitable. Il faut donc être très prudent dans l'interprétation des résultats concernant l'utilisation de ce type de téléphone et la charge cognitive qui y est associée.

Chapitre 2 Attentional demands while driving in a simulator: effects of driving straights on open roads, approaching intersections and doubling maneuvers

N. Teasdale¹ V. Cantin¹ G. Desroches¹ J. Blouin² M. Simoneau¹

¹Université Laval, Faculté de médecine, Division de kinésiologie. PEPS, Québec, Québec, Canada

²Université de la Méditerranée and UMR Mouvement et Perception, Marseille

Keywords: Simulator, attention, intersections, mental workload

Article publié dans: ADVANCES IN TRANSPORTATION STUDIES An International Journal. 2004 (special issue): 29-38.

Résumé

Proportionnellement plus d'accidents surviennent lors de situations complexes de conduite automobile comme par exemple la négociation d'une intersection (Hakamies-Blomqvist, Mynttinen et al. 1999). Cette augmentation du risque d'accident pourrait être associée à une augmentation de la charge cognitive causée par l'intersection. La présente expérimentation examine si la charge cognitive peut être modifiée lors de l'utilisation d'un simulateur de conduite. La technique du temps de réaction (TR) inattendu a été utilisée pour mesurer la charge cognitive survenant lors de la conduite d'un simulateur. La tâche primaire consistait à conduire le simulateur et la tâche secondaire à répondre vocalement (« top ») aussi rapidement que possible à un stimulus sonore tout en continuant à conduire le simulateur. Cette méthode permet d'éviter les interférences structurales. L'objectif de cette étude est d'observer si la charge cognitive nécessaire pour conduire varie en fonction du contexte de conduite présenté. Dix conducteurs actifs ont participé à cette étude. Un simulateur de conduite (STISIM v2.0) a été utilisé. Après avoir parcouru un scénario de pratique pour se familiariser avec le simulateur, les participants ont parcouru un scénario de 10 km qui incluait des sections de conduite rurale et urbaine. Spécifiquement, 26 stimuli survenaient aléatoirement lors des deux contextes suivants : a) conduite en ligne droite à vitesse constante, b) à l'approche d'une intersection où le conducteur devait s'immobiliser. À moins d'une erreur de la part du conducteur, le scénario n'incluait aucune manœuvre d'urgence. Le TR est défini comme l'intervalle de temps entre la présentation du stimulus et la réponse vocale détectée à partir du signal analogique d'un microphone piézo-électrique fixé sur un casque d'écoute (précision : ms). Plusieurs variables caractérisant la performance de conduite ont également été enregistrées. Au total, les sujets n'ont pas répondu à 2% des stimuli. La conduite du simulateur a engendré une augmentation des TRs de 245 ms par rapport à la condition contrôle. Plus spécifiquement, les TRs se sont avérés plus longs pour la condition intersection que pour la condition ligne droite et les TRs de la condition ligne droite ont été plus longs que ceux de la condition contrôle. En conclusion, l'approche technique développée a permis de quantifier la charge cognitive imposée par les scénarios de conduite.

Abstract

Proportionally more accidents are occurring in complex situations, such as intersections. Presumably, this higher rate of accidents is associated with a higher momentary mental workload created by the intersection. Two experiments are presented to examine if this mental workload can be manipulated while driving in a simulator. We adopted the probe reaction time technique to measure the attentional demands while driving. For each experiment, ten active drivers drove through a continuous 10-km scenario including rural and urban sections. They were asked to follow speed limits and to comply with local traffic laws throughout the course of the experiment. They were also told to consider driving as the primary task. For the first experiment, auditory stimuli were given while driving on open roads and when approaching intersections. The stimuli could be presented when the car was 100 m or 60 m from the intersection. For the second experiment, the stimuli were given while driving on open roads, when approaching intersections (75 m), and when performing lane change and doubling maneuvers. RT (ms accuracy) was defined as the temporal interval between the auditory stimulus and the onset of a verbal response (a loud top, detected from the analog signal of a piezo-electric microphone fixed on a headset). RT was also measured for a baseline control condition without driving (10 stimuli). Several variables characterizing the driving performance were collected. For both experiments, driving yielded RTs that were slower than for the baseline condition. More important, experiment 1 showed that stopping at an intersection required more cognitive demands than driving on open roads (on average, 519 ms for the open road conditions vs 727 ms for both intersection conditions); experiment 2 yielded similar results and the lane change and doubling maneuvers was the driving context that required the most important cognitive demands (on average, 612 ms for the open road conditions, 675 ms for the intersection conditions, and 816 ms for the lane change and doubling maneuvers). Results clearly show that driving, even for ideal conditions, is not an automatic task. Future experiments should attempt to examine whether various categories of drivers (eg novice, elderly) are affected differentially by various contexts and whether the increased mental workload has an effect on the driving performance. The technical approach developed could allow to develop more challenging scenarios and to validate workload observed for real driving contexts.

1. Introduction

Recent concerns about road safety and the use of cellular phones and other more recent in-vehicle "digital devices" have prompted a resurgence of interest into cognitive aspects of driving. When driving, introducing a secondary task (talking, radio tuning, using the cell phone) could affect the driving in one of two ways: 1) the device could produce structural interference with the driving task (for instance, by requiring the driver to shift their gaze from the road to the device or to use one hand to manipulate it) and 2) the secondary task will require a portion of the available cognitive resources. In the latter case, the performance on both tasks will depend on the amount of cognitive resources available and on how these resources are allocated to both tasks [1, 2]. For example, it is often suggested that practice and expertise allow drivers to deal adequately with added or embedded secondary tasks with nearly no added cost (for example, talking, radio tuning, using the cell phone when driving on open roads). An example of this comes from a study by Shinar et al. [3]. They showed that manual gear shifting affected the sign detection performance of novice drivers but not that of experienced drivers. Such results are often taken to suggest that driving is an overlearned and automatic task sometimes requiring little or no conscious effort [4].

On the contrary, Hancock et al. [5] have argued that support for the notion of automaticity comes from experiments in which contexts were not critical enough and allowed subjects to allocate their cognitive resources wherever they needed without interrupting or modifying their driving task. Verwey [6] also alluded to this possibility by suggesting that, for some experiments, measures of driving performance may not have been sensitive enough to report an increase mental workload. To examine this possibility, Hancock et al. [5] tested how the use of the cellular phone affects the performance of experienced drivers when more critical maneuvers have to be carried out. When approaching an intersection (closed-circuit), the traffic signal could change from green to red on one-third of the trials. Hancock et al. reported as much as 15% increase of no-response to the stop light when the cell phone was used than when it was not. The cell phone also "eroded" the safety margin (slower brake response time and decreased stopping accuracy with than without the cell phone).

This experiment is important as it clearly suggests that driving cannot be considered automated and that driving abilities (even for experienced drivers) are prone to impairment.

To examine if driving requires cognitive resources and how these resources vary with the driving context, driving has to be considered the primary task and driving should not be affected by the introduction of a secondary task [6]. This technique is central to several information-processing models proposing the nervous system has a limited central capacity [2, 7]. It is assumed that performing a task requires a given portion of this capacity, and that if two tasks performed simultaneously require more than the total capacity, the performance on one or both tasks will be affected negatively. When driving, a secondary task consisting of responding as fast as possible to an auditory stimulus (probe reaction time technique) can be used to measure the attentional demands. Any change in RT presumably would reflect changes in the cognitive resources necessary to drive. In the present experiments, we adopted this technique to examine if the attentional demands for driving in a simulator vary as a function of the driving context. In a first experiment, auditory stimuli were given when experienced drivers drove through open roads or when approaching an intersection. In a second experiment, lane change and doubling maneuvers were added. Proportionally more accidents are occurring in complex situations, such as intersections [8]. Presumably, this higher rate of accidents is associated with a higher momentary mental workload created by the driving context. Hence, an increased RT for the more complex driving conditions (lane change and doubling maneuvers and approaching an intersection vs driving straights on open roads) would suggest the driving workload in a simulator can be experimentally controlled. It would also suggest that driving, even for ideal conditions, cannot be considered as an automatic task.

2. Experiment 1

2.1 Method

2.1.1 Subjects

Active drivers with more than 3 years of driving experience (N=10, range of 21-29 years) took part in the experiment. All subjects had normal or corrected to normal vision. All

subjects gave informed consent according to University protocols and were naïve with respect to the aim of the experiment.

2.1.2 Apparatus

A fully interactive driving simulator was used in this study [9]. The validity of laboratory-based driving simulators is often questioned. There are, however, several recent studies showing their validity. For instance, Lee et al. [10] observed a significant relationship between an on-road assessment index and a simulated driving index (r^2 of .657 and .671 in two different studies). The software they used is identical to that used in the present experiment. The simulator consists of an instrumented (brake and accelerator pedals, steering and all manual controls) mid-sized sedan with automatic transmission interfaced with a programmable software [9] allowing development of driving scenarios and recording the driver's performance. Displacement of the accelerator and brake pedals are recorded (Measurement Computing PCI-DAS08 12-bit A/D). A projector (Hitachi CP-X275) allows to present the visual information on a flat wall (1.45 m high x 2.0 m wide) located 2.2 m from the steering. The center of the screen is located at eye level through the midline of the subject. No external visual information is available. Blue curtains shield the peripheral information but that available on the front wall. The simulator also includes a digital input/output board (Measurement Computing PCI-DIO24) allowing to deliver auditory stimulus through a piezoelectric speaker (100 ms, 1,5 KHz) and to activate simultaneously an electronic millisecond timer (Lafayette 54417-A). An electronic microphone (Lafayette 18010) is fixed on a headset. The microphone is activated by a verbal loud response ("top") and stops the timer.

2.1.3 Procedures

Subjects were asked to follow speed limits and to comply with local traffic laws throughout the course of the experiment. An 8-km practice run allowed subjects to get familiar with the simulator and the general feel of the pedals and steering. The instructions were to drive as normally as possible and to avoid any accident. All subjects reported being comfortable with the simulator after this run. For the experimental run, a continuous 10-km scenario including rural and urban sections was presented. The scenario included 11 intersections

(five stop signs and six crossing lights). For all intersections, the task required a careful observation of traffic conditions for decelerating and driving through the intersection carefully. Figure 1 provides examples of the visual environment presented when approaching an intersection (stop sign and crossing light) and when driving on open roads.



Figure 1. Examples of the visual environment presented when driving straight on open roads and when approaching an intersection with a stop sign or a crossing light (from left to right).

All subjects were instructed specifically that their primary task was to drive as normally as possible. While driving, they were asked to perform a secondary Probe-reaction time (RT) task. They responded vocally ("top") as rapidly as possible to an unpredictable auditory stimulus. RT (ms accuracy) was defined as the temporal interval between the auditory stimulus and the onset of the verbal response (detected from the analog signal of the piezo-electric microphone fixed on the headset). This technique is central to several information-processing models proposing that the nervous system has a limited central capacity [2]; [11]. The RT task was the secondary task and any change in RT presumably would reflect changes in the resources necessary to drive. For each 10-km run, 24 auditory stimuli were given. The stimuli were given when subjects were driving straight on open roads ($n=13$) or while approaching an intersection ($n=11$). More specifically, the auditory stimuli were given when the car was at 100 m ($n=7$) or 60 m ($n=4$) from the intersection. For the eleven intersections, five were stop signs and six were crossing lights. We first submitted mean RTs to a t-test for dependent samples to determine if RTs varied as a function of the type of intersection. The difference between stop signs and crossing lights was not significant ($t(9) = 0.42$) and because of the small number of stimuli for each type of intersection, RTs were pooled together for each distance (100 m and 60 m). A baseline measure of the speed

necessary to respond to a randomly presented auditory stimulus was taken. Baseline RTs were collected while subjects were simply seated in the simulator without driving. Ten auditory stimuli were given randomly within a 5-min period. Finally, driving conditions without auditory stimulus (that is, catch trials) were also presented to prevent subjects from anticipating the presence of a stimulus.

2.2 Data analyses

2.2.1 Reaction Time

A common statistical procedure for analysing RT data consists of eliminating trials diverging from the mean. Such responses are considered outliers and it is thought they have a negative impact on the accuracy of data. Presumably, this is because longer RTs inflate unduly the mean RT which is an estimate of the duration of cognitive processes. Hence, the implicit assumption underlying this approach is that RTs are distributed normally and the average RT reflects the average behavior observed for a given condition. A first analysis of probe RTs was thus conducted by removing, for each subject, trials for which RTs were faster or slower than each subject's mean RT plus or minus two standard deviations. Overall, this procedure removed 4.4 % of the RTs ($n = 16$ trials). Mean RTs for all conditions were then submitted to a one-way ANOVA with repeated measures (four levels; baseline, open roads, 100 m from the intersection, and 60 m from the intersection).

The above assumption, however, may not be valid for all purposes. For instance, when one is interested on the effect of the slowest response of a person because it could yield to a "worst-case" scenario, removing these trials would correspond to removing the signal and not noise. Hence, removing slower RT responses could yield to an underestimation of the time necessary to respond to a stimulus. This could be critical while driving. Similar variability issues have been raised for determining the legibility distance for highway signs [12]. In this particular case, the authors suggested that recommended distances at which signs are placed should be determined on the basis of the worst-case scenario rather than the mean of a population. For this reason, we also analysed probe RTs by taking, for each subject, the fastest and the slowest RT observed for each condition. Data for the fastest and

slowest RTs were submitted to separate one-way ANOVA with repeated measures (baseline, open roads, 100 m from the intersection, and 60 m from the intersection).

2.2.2 Driving performance

The overall driving performance was described using the time needed to complete the experimental run, the number of major driving errors (accidents or failure to stop when requested), the time to stop (time between first contact with the brake pedal and the complete stop of the vehicle at the intersection), the speed of the vehicle and the time-to-intersection when the probe was given. The time-to-intersection is defined as the time to reach the intersection assuming the vehicle would progress with a constant speed. Finally, the distance of the vehicle from the intersection at the first contact with the brake pedal (m) was measured. The list of these variables is provided in Table 1.

Table 1. Summary of driving performance. Mean (standard deviation). F-values are provided when comparisons between data for the 100 m and 60 m conditions are made.

| | | |
|--|--|----------------------------|
| Time to complete the experimental run (s) | 10 min 32 s (31 s) | |
| Major error (n) | 1 accident | |
| Time to stop (s) | 11.3 s (2.6) | F(1,9) = 0.23, p = 0.64 |
| Distance from intersection at first contact with the brake pedal (m) | 37.8 m | F(1,9) = 0.15, p = 0.70 |
| Time to intersection at first contact with the brake pedal (s) | 6.7 s (0.95) | F(1,9) = 1.57, p = 0.24 |
| Speed when the stimulus was given (km/h) | 73 km/h, open roads 64 km/h, 100 m from the intersection 43 km/h, 60 m from the intersection | F(2,9) = 184.80, p < 0.001 |

2.3 Results

2.3.1 Probe RT

Figure 2 presents the mean RTs for the four conditions. The ANOVA yielded a significant effect of conditions ($F(3,10) = 18.03$, $p < 0.001$). Comparison of means showed that the baseline RTs were faster than for all other conditions ($p < 0.01$). Probe RTs for the open roads conditions were faster than those observed when approaching an intersection ($p < 0.01$). Probe RTs for the 100 m and 60 m conditions were not statistically different ($p > 0.05$).

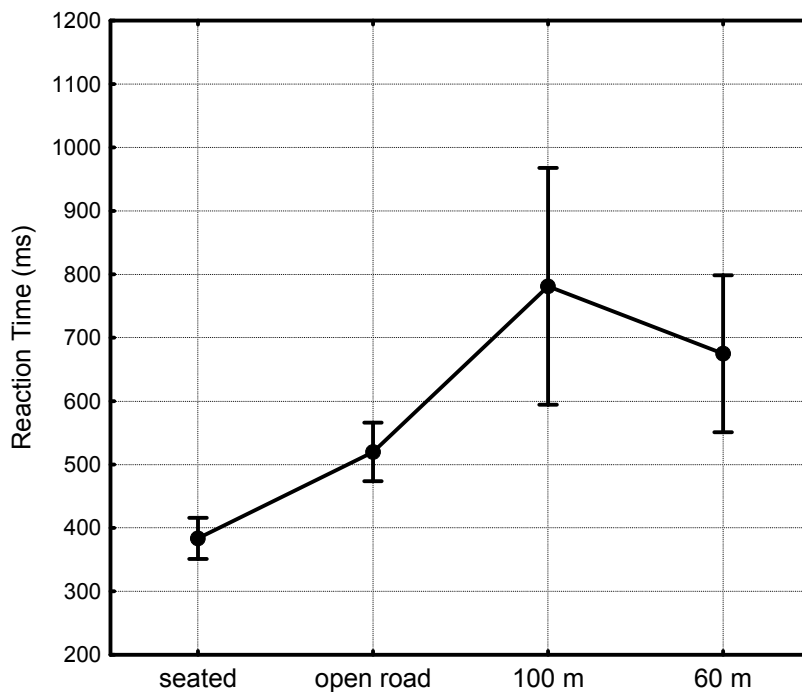


Figure 2. Mean probe RTs (without the outliers) for the four conditions presented in Experiment 1.

Figure 3 presents the results for the fastest and slowest RTs observed for each condition. For comparison purposes, data for the mean RTs also are presented. The ANOVAs for the fastest and slowest RTs yielded similar results than those observed for the mean RTs ($F(3,10) = 28.97$, $p < 0.001$ and $F(3,10) = 7.95$, $p = 0.001$ for the fastest and slowest RTs, respectively). For each analyses, the comparison of means yielded similar results than

those observed for the mean RTs. The important observation arising from Figure 3, however, is that approaching an intersection yielded an increased cognitive load. This was observed, even for the fastest RTs recorded. On average, for the fastest RTs, approaching the intersection (mean for the 100 m and 60 m conditions) yielded RTs that were 110 ms slower than the fastest RTs observed when driving on open roads. For the slowest RTs, this difference increased to 398 ms, suggesting the cognitive requirements were sometimes very high. Also, it is for the intersection conditions that no response to the auditory stimulus was observed for 2% of the trials (4 stimuli).

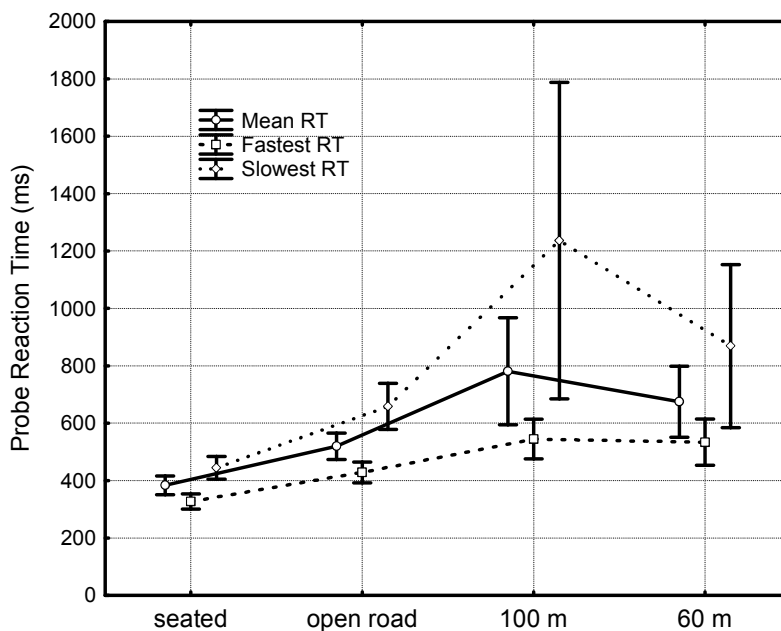


Figure 3. Fastest and slowest probe RTs for the four conditions. For comparison purposes, Mean probe RTs (without the outliers) also are illustrated.

2.3.2 Driving performance

Table 1 presents a summary of the driving data. On average, subjects needed 10 min and 32 s to complete the run. Only one major error was recorded suggesting that subjects complied with the request to drive as normally and as carefully as possible. The time to stop (that is, the temporal interval between the first contact with the brake pedal and the complete immobilization of the vehicular at the intersection) was not affected by the introduction of the probe RT. On average, this interval was 11.3 s ($p > 0.05$). On average, the first contact

with the break pedal was at 37.8 m from the intersection and this value did not vary for the 100 and 60 m conditions ($p > 0.05$). The time to intersection at the first contact with the break pedal also was constant for the 100 m and 60 m conditions (6.7 s, $p > 0.05$). The speed when the stimulus was given, however, decreased as the driver got closer to the intersection (73, 64 and 43 km/h for driving on open roads, 100 m from the intersection and 60 m from the intersection, respectively; $p < 0.001$).

2.4 Discussion

The aim of this experiment was to examine whether the Probe RT technique would allow to show changes in the attentional demands as a function of the driving context. The results clearly show that driving is not an automatic task and that attentional demands are more important when approaching an intersection than when driving on open roads. A more specific analysis of the RTs, using the slowest and the fastest RTs of each subject for each condition (baseline, open roads, 100 m and 60 m), illustrates that, even for the fastest RTs, driving straights on open roads required cognitive resources and approaching an intersection was more demanding than driving straights on open roads.

Most simulators allow a smaller field of view than that available for on-the-road conditions (about 45 degrees in our case). This is often considered a severe limitation of simulators as the limited field of view does not permit to present driving conditions that are considered more complex such as left-turn maneuvers at an intersection. In an attempt to simulate the cognitive demands required by such conditions we conducted a second experiment with new driving contexts that required lane change and doubling maneuvers. Rather than simply stopping at an intersection, this maneuver requires the driver to signal the intention to proceed, to process visual information from various sources (for instance, evaluate the distance from the cars that precede and follow the driver's car), to determine if the traffic flow allows a secure maneuver, and the actual execution of the maneuver.

3.0 Experiment 2

The second experiment had the same general procedures than Experiment 1. We wanted to replicate the overall results with new driving scenarios and new participants. The general

hypothesis was that, compare to the other driving contexts, the lane change and doubling maneuvers should yield an increased RT suggesting a more important cognitive demand.

3.1 Method

Ten new active drivers with more than 3 years of driving experience (N=10, range of 20-31 years) took part in the experiment. All subjects had normal or corrected to normal vision. They gave informed consent according to University protocols and were naïve with respect to the aim of the experiment. Instructions to subjects and general procedures were identical to those used in Experiment 1.

After an 8-km practice run was given. The length of the experimental scenario was extended to 26.35 km. It included rural and urban sections. Stimuli were given when subjects drove straights on open roads (n=14), when stopping for an intersection (n = 15, 75 m from the intersection), and during lane change and doubling maneuvers (n=4). A control seated condition also was given (n =10). Driving conditions without auditory stimulus (that is, catch trials) were presented to prevent subjects from anticipating the presence of a stimulus.

3.2 Results

On average, subjects needed 25 min 34 sec to complete the experimental scenario; 4 accidents were noted. As for Experiment 1, this first analysis excluded outliers (n = 30, 8.5% of the RT responses). Figure 4 presents the mean RTs for the four conditions. The ANOVA yielded a significant effect of conditions ($F(3,10) = 29.40, p < 0.001$). Comparison of means showed that the baseline RTs were faster than for all other conditions ($p < 0.001$). Probe RTs for the open roads conditions were faster than those observed when approaching an intersection ($p < 0.005$). Finally, Probe RTs when approaching an intersection were faster than those observed when performing lane change and doubling maneuvers ($p < 0.05$).

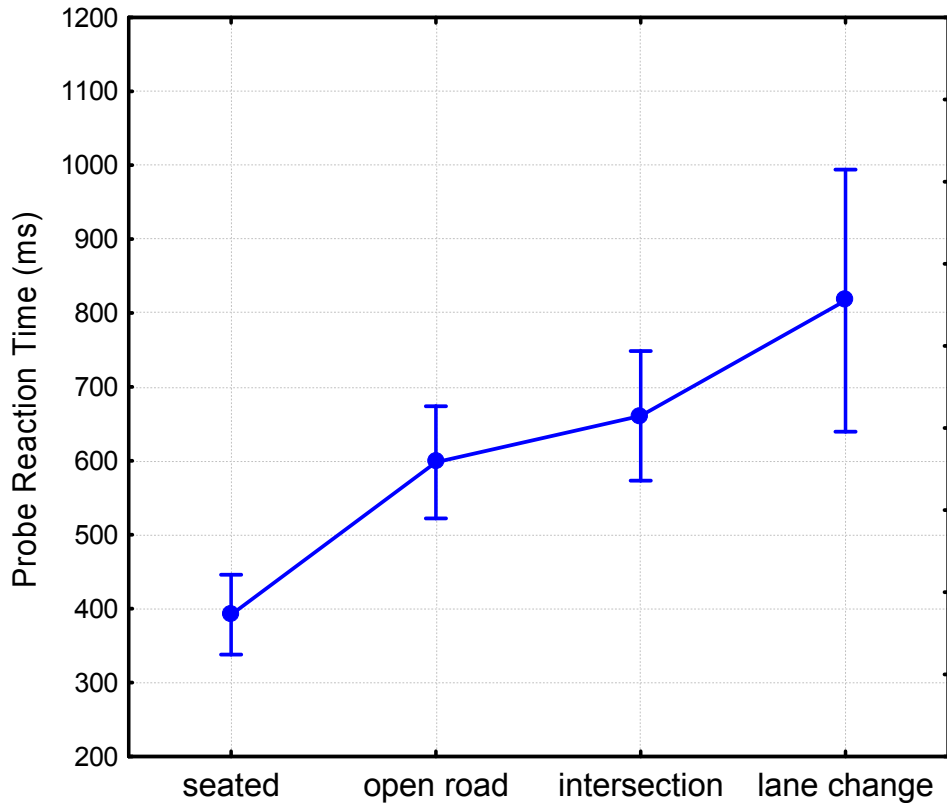


Figure 4. Mean probe RTs (without the outliers) for the four conditions presented in Experiment 2.

Figure 5 presents results for the fastest and slowest RTs observed for each condition. For comparison purposes, data for the mean RTs also are presented. The ANOVAs for the fastest and slowest RTs yielded similar results than those observed for the mean RTs ($F(3,10) = 36.44$, $p < 0.001$ and $F(3,10) = 8.25$, $p < 0.001$ for the fastest and slowest RTs, respectively). With a few exceptions, both analyses yielded results that mirrored those observed for the mean RTs. The only differences being: 1) the fastest RTs for the open roads and stopping for an intersection conditions were not statistically different ($p > 0.05$), and 2) the slowest RTs for stopping for an intersection and for the lane change and doubling maneuvers also were not statistically different ($p > 0.05$). All other comparisons were statistically significant ($ps < 0.01$). Again, an important observation arising from Figure 5 is that, even when analyzing the fastest RTs, one can observe a clear increase in the cognitive demands associated with driving. Also, the lane change and doubling maneuvers required greater cognitive demands. For the slowest RTs, the intersections and

the lane change and doubling maneuver yielded the slowest RTs. As for Experiment 1, the cognitive demands were exacerbated when more difficult scenarios were presented.

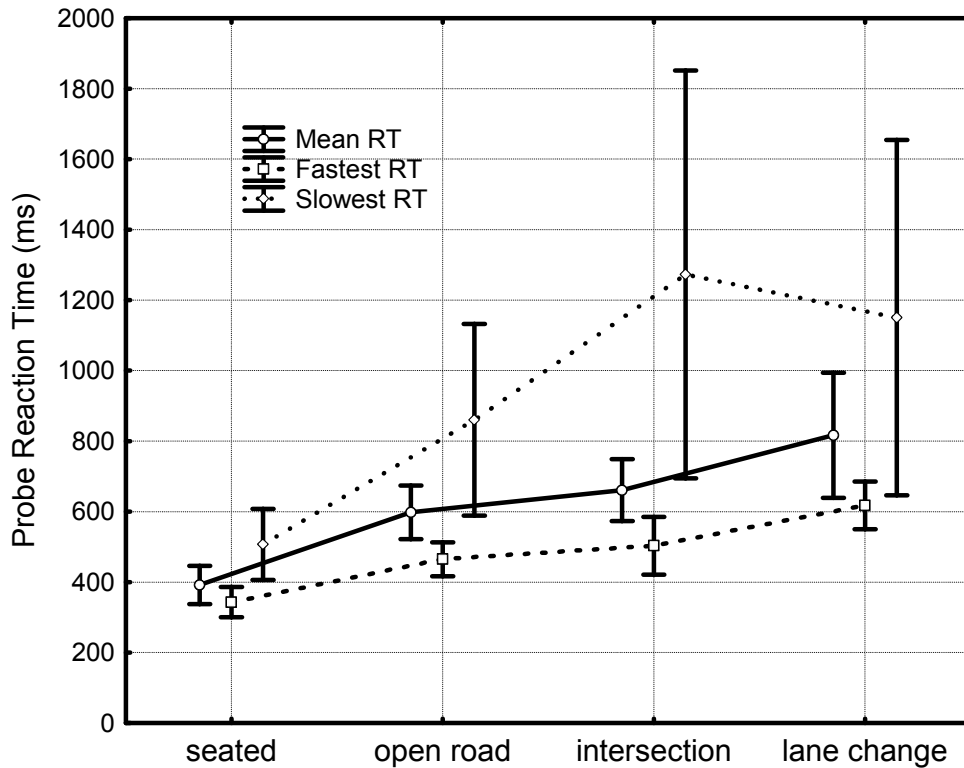


Figure 5. Fastest and slowest probe RTs for the four conditions. For comparison purposes, Mean probe RTs (without the outliers) also are illustrated.

4.0 General discussion

Overall, both experiments clearly demonstrate that it is possible to manipulate the mental workload imposed by specific driving scenarios. Despite that different subjects and different scenarios were used, results from both experiments are remarkably similar; all driving conditions required more cognitive demands than the control seated condition. More important, for both experiments, driving straights on open roads required less cognitive demands than stopping for an intersection or performing more complex lane change and doubling maneuvers. This has important technical and practical implications for studies using driving simulators.

Driving conditions in both experiments were nearly ideals. For laboratory RT tasks, there are examples that an analysis of the fastest RTs can allow to vanish an experimental effect. For example, it is well known that, with aging, simple auditory reaction time slows by about 0.6 ms a year between age of 20 and 96 [13]. When the fastest times are analyzed, however, the age difference disappears [14]. In the present experiment, the analysis of the fastest RTs did not eliminate the effect observed with the mean RTs and the slowest RTs. The clear modulation of RTs as a function of the driving context supports the suggestion that approaching an intersection is a highly demanding task. It is an additional support to recent suggestions that driving should never be considered as an automatic task [5, 15]. When approaching the intersection, the analysis of the slowest RTs showed a four-fold increase in the cognitive demands. This observation agrees with the suggestion that driving through an intersection is one of the most difficult aspect of driving [8]. For older drivers, there are numerous database showing that proportionally more accidents occurs at intersections [8, 16-18]. To explain these high rates of accidents, [8] suggested that intersections could produce very high momentary mental workload; it is this mental workload that would yield driving errors. In experiment 2, we showed that complex maneuvers (lane change and doubling) could also be considered as challenging as the cognitive demands were more important than when stopping at an intersection.

An analysis of extreme responses, such as the slowest RTs, rather than mean responses, could better reveal the at-risk drivers. These events could represent "worst-case" scenarios [12] and an effort should be made to better understand whether they provide insights into the cognitive sequences leading to accidents. In the present experiment, there were auditory stimuli that were not responded to when approaching the intersection (4 in Experiment 1 and 7 in Experiment 2). For these trials, we did not observe an effect on the driving performance. It is possible, however, that a reallocation of the cognitive resources available could have yielded a decreased driving performance (for instance, by simply asking to consider the probe RT task as the primary task). There are several reports that such techniques (divided attention task) perturbs the driving performance. The work of Hancock et al. [5] reported in the introduction is one of several examples of this effect.

In a literature review of human factors leading to unintended acceleration, Schmidt [19] has argued that the sources of such errors could be related to motor control processes in pedal operation. The process leading to errors could be akin to the progression-regression hypothesis [20]. This hypothesis states that with increased practice and expertise, the learner uses higher order information. Under stressful or difficult conditions, the person regresses to a more simple level of control with systematically reduced accuracy as a consequence [21]. The probe RT technique and the analyses of extreme responses could provide a window into the driving conditions and contexts yielding to errors. It could also provide a better description of the behaviour of drivers with lack of experience or older drivers when they face more complex driving scenarios.

For Experiment 1, stimuli were given 100 m or 60 m from the intersection. For Experiment 2, a mid-range value of 75 m was selected. These values were arbitrarily selected. The cognitive demands when stopping for the intersection could vary as a function of when the driver actually decides to afford and process the visual information available. For instance, a foggy context (this was not used in our experiment) could yield fast RTs 100-m from the intersection because the information about the intersection would not be available to process. This aspect was not controlled in the present experiments. Nevertheless, the overall results for both experiments show that stopping for the intersection yielded slower RT, (hence, required more cognitive demands) than driving straights on open roads.

5.0 Conclusion

The probe RT technique was used to examine whether the cognitive demands for driving in a simulator varied as a function of the various scenarios presented. RT data showed that, even for driving straights on open roads, driving was not an automatic task. Approaching an intersection yielded increases in RT and lane change and doubling maneuvers was the most demanding driving context presented.

6.0 References

1. Shinar, D. 1978, *Psychology on the road: The human factor in traffic safety*, John Wiley, New York.
2. Kahneman, D. 1973, *Attention and effort*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
3. Shinar, D., Meir, M. & Ben-Shoham, I. 1998, 'How automatic is manual gear shifting?' *Human Factors*, vol. 40, no. 4, pp. 647-54.
4. Matthews, R., Legg, S. & Charlton, S. 2003, 'The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing', *Accident Analysis and Prevention*, vol. 35, pp. 451-457.
5. Hancock, P., Lesch, M. & Simmons, L. 2003, 'The distraction effects of phone use during a crucial driving manoeuvre', *Accident Analysis and Prevention*, vol. 35, pp. 501-514.
6. Verwey, W. 2000, 'On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures', *Ergonomics*, vol. 43, no. 2, pp. 187-209.
7. Wickens, C. D. 1984, 'Processing resources in attention', in R. Parasuraman & D. R. Davies, (eds.), *Varieties of attention*, Academic Press, New York, pp. 63-102.
8. Hakamies-Blomqvist, L., Mynttinen, S., Backman, M. & Mikkonen, V. 1999, 'Age-related differences in driving: Are older drivers more serial?' *International Journal of Behavioral Development*, vol. 23, no. 3, pp. 575-589.
9. R. W. Allen, T. J. Rosenthal, B. L. Aponso, A. Harmsen, and S. Markham, "A Low Cost Platform for Training and Evaluating Driver Behavior," presented at DSC2002 7th Driving Simulator Conference and Exhibition, Paris, France, September 11-13 2002.
10. Lee, H., Cameron, D. & Lee, A. 2003, 'Assessing the driving performance of older adult drivers: on-road versus simulated driving', *Accident Analysis and Prevention*, pp. in-press.
11. O'Donnell, B. F. & Cohen, R. A. 1993, 'Attention: A component of information processing', in R. A. Cohen, (ed.) *The neuropsychology of attention*, Plenum Press, New York, pp. 11-48.
12. Greene, F., Koppa, R., Zellner, R. & Congleton, J. 1997, 'Determining legibility distance for highway signs: Is the within subject variability being overlooked?' in W. Rogers, (ed.) *Designing for an aging population*, Human Factors and Ergonomics Society, Santa Monica, pp. 305-309.
13. Fozard, J. L., Vercryssen, M., Reynolds, S. L., Hancock, P. A. & Quilter, R. E. 1994, 'Age differences and changes in reaction time: the Baltimore Longitudinal Study of Aging', *Journal of Gerontology*, vol. 49, no. 4, pp. P179-89.

14. Gottsdanker, R. 1982, 'Age and simple reaction time', *Journal of Gerontology*, vol. 37, no. 3, pp. 342-8.
15. Groeger, J. & Clegg, B. 1997, 'Automaticity and driving: time to change gear?' in T. Rothengatter & E. Carbonell Vaya, (eds.), *Traffic and transport psychology: Theory and application*, Pergamon, Amsterdam, pp. 137-146.
16. Cooper, P. J. 1990, 'Differences in accident characteristics among elderly drivers and between elderly and middle-aged drivers', *Accident Analysis and Prevention*, vol. 22, no. 5, pp. 499-508.
17. Hauer, E. 1988, *The safety of older persons at intersections. Transportation in an aging society*, Transportation Research Board, Washington, DC, Special Report 218, Volumes 1 and 2.
18. Owsley, C., Ball, K., McGwin, G., Jr., Sloane, M. E., Roenker, D. L., White, M. F. & Overley, E. T. 1998, 'Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults', *Journal of the American Medical Association*, vol. 279, no. 14, pp. 1083-8.
19. Schmidt, R. 1989, 'Unintended acceleration: A review of human factors contributions', *Human Factors*, vol. 31, pp. 345-364.
20. Fuchs, A. H. 1962, 'The progression-regression hypotheses in perceptual-motor skill learning', *Journal of Experimental Psychology*, vol. 63, pp. 177-82.
21. Schmidt, R. A. 1988, *Motor control and learning*, 2nd edn, Human Kinetics, Champaign.

Chapitre 3 Aging yields a smaller number of fixations and a reduced gaze amplitude when driving in a simulator

M. Lavallière, M. Tremblay, V. Cantin, M. Simoneau, N. Teasdale

Université Laval, Faculté de médecine, Division de kinésiologie. PEPS,
Québec, Québec, Canada

Keywords: driving, simulator, gaze, aging

Article publié dans: ADVANCES IN TRANSPORTATION STUDIES An International Journal. 2006 (special issue): 21-30

Résumé

Avec l'avancement en âge de la population actuelle, il nous importe de savoir si les stratégies de recherche visuelle sont affectées par l'âge et par la complexité des contextes de conduite. L'étude présentée visait à documenter les comportements oculaires de conducteurs âgés dans des situations de conduite simulée. Après une familiarisation avec un environnement de simulation (STISIM v.2.0), les participants (10 conducteurs de 20 à 31 ans et 10 conducteurs âgés de 65 à 75 ans) ont parcouru un scénario de 26.4 km. Le scénario comprenait des sections de conduite rurale et urbaine. L'axe du regard était enregistré à l'aide d'un oculomètre (ASL model 510). Comparativement aux conducteurs jeunes, les conducteurs âgés ont montré une amplitude horizontale plus petite entre les fixations et une variabilité d'amplitudes moins grandes entre les fixations. De plus, les conducteurs âgés ont montré un plus petit nombre de fixations par seconde lors de contextes de conduite plus complexes qui ont été analysés (manoeuvres de dépassement). Il importe de déterminer si ce champ visuel mène à des omissions d'informations importantes pour la réalisation de la tâche de conduite.

Abstract

With the increasing number of elderly drivers, it is important to better understand if strategies for capturing visual information are affected by age and by the complexity of the driving contexts. Ten young (aged 21-31 years) and older (aged 65-75 years) active drivers drove through a continuous simulated scenario (STISIM, v2.0). The scenario included driving on open roads (less demanding), stopping at intersections and passing maneuvers (more demanding). Eye movements were recorded with an oculometer (ASL, model 510). Compared to younger drivers, older drivers showed a smaller horizontal amplitude between fixations and a smaller variance in the amplitude of the eye movements. They also showed a smaller number of fixations/sec for the more complex driving maneuvers that were analyzed (passing maneuvers). Overall, this may reveal a "tunnel effect" (or perceptual narrowing) phenomenon when the driving context increases in complexity.

1. Introduction

Driving a car is a complex task requiring the driver to select and process visual information from various sources (for example, road signs and the behavior of other cars) before proper motor responses for controlling the vehicle are planned and executed. In everyday life, the pattern of eye-movements is thought to be a top-down mechanism [1-4] characterized by specific learned pattern of fixations (for a recent review of this work, see [5]). For instance, in their landmark work, Mourant and Rockwell [6] reported that novice drivers concentrated their fixations in a smaller area (smaller range of horizontal scanning) and sampled their mirrors less frequently than experienced drivers. More recently, Crundal and Underwood [7] reported smaller horizontal variance for novice than experienced drivers. Interestingly, they also showed search strategies that differed as a function of the driving context; experienced drivers showed long fixations on the rural roads where there were few hazards and shorter fixations on the dual-carriageways where there were multiple hazards whereas novices tended to look longer on the dual-carriageways. These differences were not simply the consequence of a greater mental workload associated with controlling the car for the novice drivers because similar observations were made when drivers were simply watching film clips recorded from the driver's perspective [8]. Underwood et al. [8] suggested that novice drivers have an incomplete mental model of the driving task, particularly in more complex driving contexts, which yielded to a reduced inspection of dynamics events on demanding roadways.

Overall, the above work has been taken as strong support for the suggestion that, when driving, there are task-specific strategies serving to circumscribe the information available and to simplify the response selection process. Whether and how aging modifies the pattern of fixations is not well known, however. When static traffic scenes are presented without specific search instructions, Maltz et al. [9] reported longer search episodes for older than younger subjects. The visual searches of older drivers were also characterized by more fixations and shorter saccades. With a search task requiring to identify particular traffic signs within a traffic scene, McPhee et al. [10] reported that older adults exhibited longer fixations when a simulated conversation was added. When cluttered scenes were presented,

older adults were also less accurate to identify that a target sign was present and slower to decide that a target sign was not present. In a recent experiment, however, Underwood et al. [11] reported a lack of age difference in the scan pattern of older and younger drivers when watching film clips recorded from the driver's perspective. Their task, however, required drivers to identify hazardous contexts from film clips. These specific instructions could have triggered particular search strategies that, although they could be advantageous for driving, are not those normally adopted when driving.

For older drivers, there are numerous databases showing that proportionally more accidents occur when the driving context increases in difficulty, for example at intersections [12-15]. To explain these high rates of accidents, Hakamies-Blomqvist et al. [12] suggested that these difficult contexts could produce very high momentary mental workload; it is this mental workload that would yield driving errors. Using a divided-attention task, Hancock et al. [16] reported that turn sequences are more demanding than straight driving supporting the suggestion that more demanding traffic contexts may yield a cognitive overload. These effects may be exacerbated for older drivers as several cognitive functions involved in driving decline with age (e.g., selected and divided attention, vigilance, etc.). Using a similar protocol to that of Hancock et al. [16] we showed that, when driving in a simulator, stopping at intersections needed more attentional demand than driving on straight roads (as indexed by longer RT), and passing maneuvers needed more attentional demands than stopping at intersections [17]. Older drivers also showed this effect but the more complex contexts exacerbated the cognitive demands [18].

In the present study, we built on this work and examined the scan patterns of younger and older drivers when driving in a simulator. The fixations were examined in three specific driving contexts (driving on open roads, stopping at intersections, and passing maneuvers) selected because they varied in complexity and in their cognitive demands. It was expected that, for the elderly drivers, driving through more complex contexts would yield fixations of longer durations with a reduced gaze amplitude and variance between successive fixations.

2. Methods

2.1. Subjects

Ten young subjects (20 to 31 years) and ten older drivers (65 to 75 years) participated (all males). All subjects were active licensed drivers (minimum of 3 years of driving experience for young drivers). All participants reported having driven more than 5000 km in the preceding year. They were recruited through advertisements in local newspapers and aging coalitions. Upon their arrival in the laboratory, each participant was briefed on the requirements of the experiment and all read and signed an informed consent document. The experiment was reviewed and approved by the Université Laval Institutional Review Board. Then, subjects were given a general verbal questionnaire including items on driving (years of driving experience, frequency of driving and average km/week and year, presence of accident within the last years) and health in general (neurological and musculoskeletal problems, use of medication, drinking habits). Simple clinical tests (MMSE [19], Snellen visual acuity, Melbourne Edge test [20], ankle proprioception acuity, lower limb touch thresholds measured with a Semmes-Weinstein pressure aesthesiometer) were used to screen for impairments that might affect driving and cognition. All elderly scored 27 or higher on the MMSE and had normal or corrected to normal vision. Table 1 provides a summary of these results. Data for one older driver were not included in the eye movement analyses because of a ptosis problem (drooping eyelids).

2.2 Apparatus

Participants were tested in a fully interactive driving simulator. The simulator consists of an instrumented mid-sized sedan with automatic transmission (brake and accelerator pedals, steering and all manual controls) interfaced with programmable simulation software (STISIM v.2.0) [21]. The software allows to develop driving scenario and to record the driver's performance. Displacement of the accelerator and brake pedals and steering movements are recorded (Measurement Computing PCI-DAS08 12-bit A/D). The display system uses an Hitachi CP-X275 LCD projector to present the visual information on a flat wall (1.45 m high x 2.0 m wide) located 2.2 m from the steering. The center of the screen is located at eye level through the midline of the subject. The simulator offers a 40° horizontal

by 30° vertical field-of-view. Blue curtains shield the peripheral information but that available on the front wall.

Eye movements were monitored using an oculometer (Applied Science Laboratories, ASL, model 510, Cambridge, MA) at a sampling rate of 60 Hz. A head tracking device (Flock of birds) is included with the system to enhance the automatic tracking of the eye and to allow free head movements. A fixation was defined as three successive gaze positions (xy coordinates) staying within 1° of each other for a minimum duration of 100 ms.

2.3 Procedure

Subjects were made aware that simulators could make them feel uncomfortable. They were specifically instructed to inform the experimenter if this happened and were told the experiment would stop immediately without any prejudice for them. To reduce these sensations, the temperature within the room was maintained at about 17 C. The simulator is an open cab and ventilation is provided with a ceiling vent positioned just above the driver. A 12-km practice scenario (with less graphical information than the experimental scenario) was also presented and served the purpose of familiarizing subjects with the simulator and the general feel of the pedals and steering. A 5-min rest between the practice and the experimental run was provided. With these measures, we have less than 5% of our subjects reporting sensations preventing them from pursuing the experiment. In the present experiment, all but 2 subjects reported being comfortable after the practice run. Data for these two subjects are not reported herein.

The experimental run consisted of a continuous route of 26.4 km of urban and rural roads. The scenario included a normal driving environment (intersections with stop sign or crossing light, two-way and four-way roads, urban and rural areas) that did not require any emergency braking response unless a driving error was made. Subjects were asked to follow speed limits and to comply with local traffic laws throughout the course of the experiment.

To comply with the 40 degree field of view of our simulator, there were no right- or left-turn maneuvers at intersections. Also, the smallest radius for the curves was 408 feet. This

is sometimes considered a limitation of simulators as subjects do not go through maneuvers that are considered more complex (e.g. left-turn at an intersection). As for on-the-road maneuvers [16], however, more complex maneuvers require greater cognitive demands and driving straights on open roads require less cognitive demands than stopping at intersections, while stopping at intersections require less cognitive demands than more complex passing maneuvers [17, 18].

We built on this work and recorded eye movements for 26 segments of 100 m within the overall scenario (open road sections, $n=6$; intersections where the driver needed to stop, $n=15$; passing maneuvers, $n = 5$). The number of segments is not counterbalanced for each different type of driving context. We feel this is a necessary compromise to attain some ecological validity. For the passing maneuvers, a recorded message indicated in advance to the driver that he would encounter a slower vehicle and that he should safely pass this car. For instance, for one of the passing maneuvers, the verbal message was presented when driving on an initial one-way route segment through an urban landscape. This roadway opened onto a long two-lane straight section with slow trucks ahead of the driver. Recording of eye movements always started before the actual passing maneuver.

2.4 Data analyses

Gaze amplitude (along the horizontal axis) and mean number and duration of fixations were analyzed for each segment. All variables were submitted to 2 x 3 (Groups x Driving contexts) ANOVAs with repeated measures on the last factor. When needed, means were compared with the Tukey post-hoc test ($p < 0.05$).

3. Results

3.1 Driving performance

Overall, the time required to complete the experimental scenario was longer for older than for young driver (on average, 30.7 min vs. 25.6 min.; $p < 0.01$). We observed only 1 accident. This accident was for one elderly driver and a review of the accident showed that this driver never looked at the crossing light in the 100 m preceding the intersection. The driver went through the red light and this yielded a side crash.

3.2 Number of fixations and duration of the fixations

Older drivers showed a greater number of fixations than younger drivers and this was observed for all three driving contexts (on average, 23.4 vs 18.1 fixations; $P < 0.05$ for the main effect of Group and $P > 0.05$ for the interaction of Group x Driving context). The main effect of Driving context also was statistically significant ($p < 0.05$); both groups showed more fixations when stopping at intersections than during passing maneuvers and both contexts yielded more fixations than driving on open roads (14.2, 26.8, and 21.2 fixations for open roads, stopping at intersections and passing maneuvers, respectively; $p < 0.05$). Some of these differences could result from the slower driving of the older drivers. For this reason, we also computed the number of fixations/sec. Figure 1 shows the normalized number of fixations for all driving contexts. The ANOVA yielded a significant main effect of Driving context and a significant interaction of Group by Driving context ($p < 0.01$). The main effect of Group was not statistically significant ($p > 0.05$). More fixations per sec were observed when driving on open roads and during passing maneuvers than when stopping at intersections ($p < 0.01$). A decomposition of the interaction into its simple main effects showed that a significant Group difference was observed only for the passing maneuvers where the older drivers showed less fixations per sec than younger drivers ($p < 0.01$).

For the duration of the fixations, older drivers showed longer fixations than younger drivers (on average, 375 ms vs 340 ms for the older and younger drivers, respectively) but this effect did not reach the significance level ($p > 0.05$). The ANOVA showed a main effect of Driving context only ($p < 0.05$; $p > 0.05$ for the interaction of Group x Driving context). A comparison of means showed that, on average, the duration of the fixations was longer when driving on open roads than when stopping at intersections (377 ms vs 338 ms; $p < 0.05$). All other comparisons were not significant ($p > 0.05$; 353 ms for the mean duration of the fixations for the passing maneuvers).

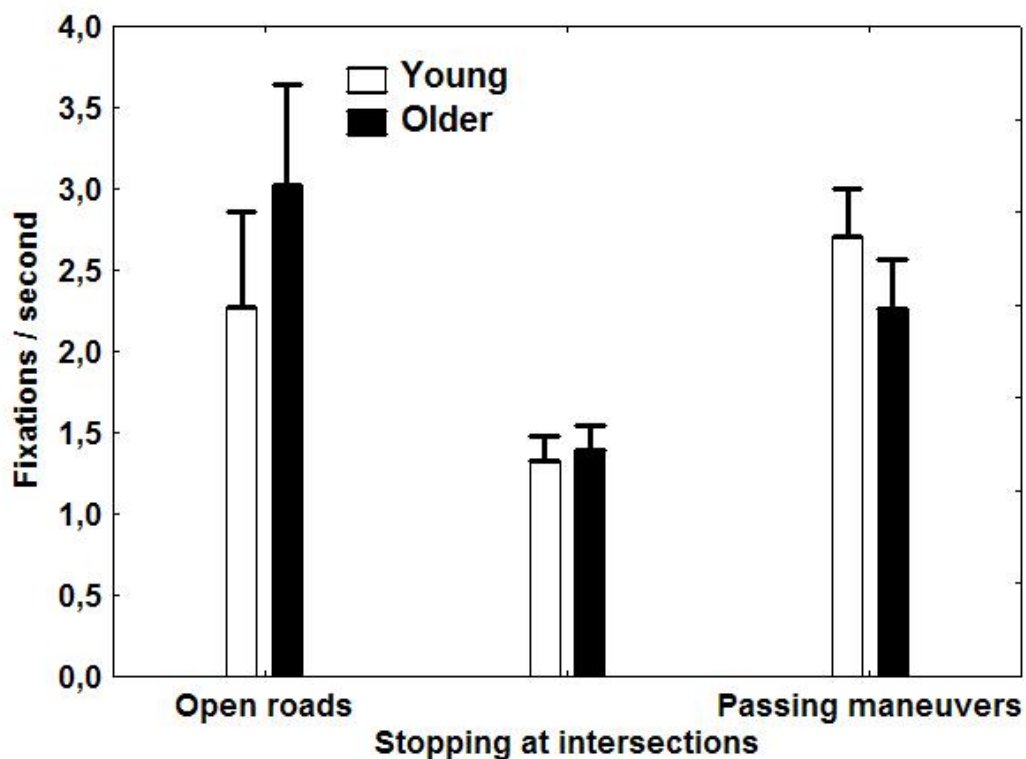


Figure 1. Mean normalized number of fixations (per second). Confidence intervals (95% of the data distribution) are also presented.

3.3 Horizontal gaze amplitude

For each subject, we computed the horizontal amplitude of the gaze. Figure 2 presents the amplitudes for each driving contexts. The ANOVA yielded main effects of Group ($p < 0.05$) and Driving contexts ($p < 0.05$). The interaction of Group by Driving context was not significant ($p > 0.05$). Older drivers showed a reduced gaze amplitude in comparison with younger drivers (on average, 20.6 vs 24.3 deg). For both groups, the horizontal amplitude was smaller when driving on open roads than for the other two contexts ($p < 0.05$). It was also greater when stopping at intersections than for passing maneuvers ($p < 0.05$).

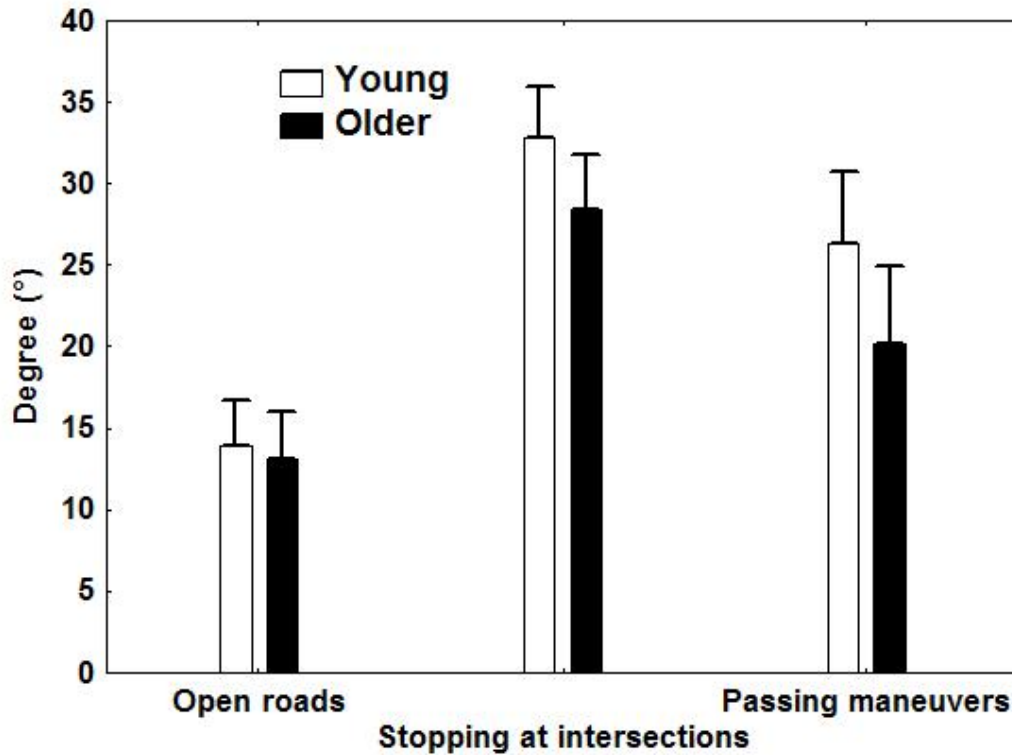


Figure 2. Mean horizontal amplitude of fixations (deg). Confidence intervals (95% of the data distribution) are also presented.

We also looked at the variance of the eye movements (that is, the standard deviation of the gaze amplitude within a segment). The results mimicked those observed for the gaze amplitude. Older drivers showed less variance than younger drivers (on average, 2.2 deg vs 2.9 deg; $p < 0.05$). The Group by Driving context was not statistically significant ($p > 0.05$). The main effect of Driving context, however, was significant ($p < 0.001$) and the variance was smaller when driving on open roads than for the two other driving contexts (on average, 1.7 deg vs 2.9 deg and 2.9 deg for the open roads, stopping at intersections and passing maneuvers, respectively).

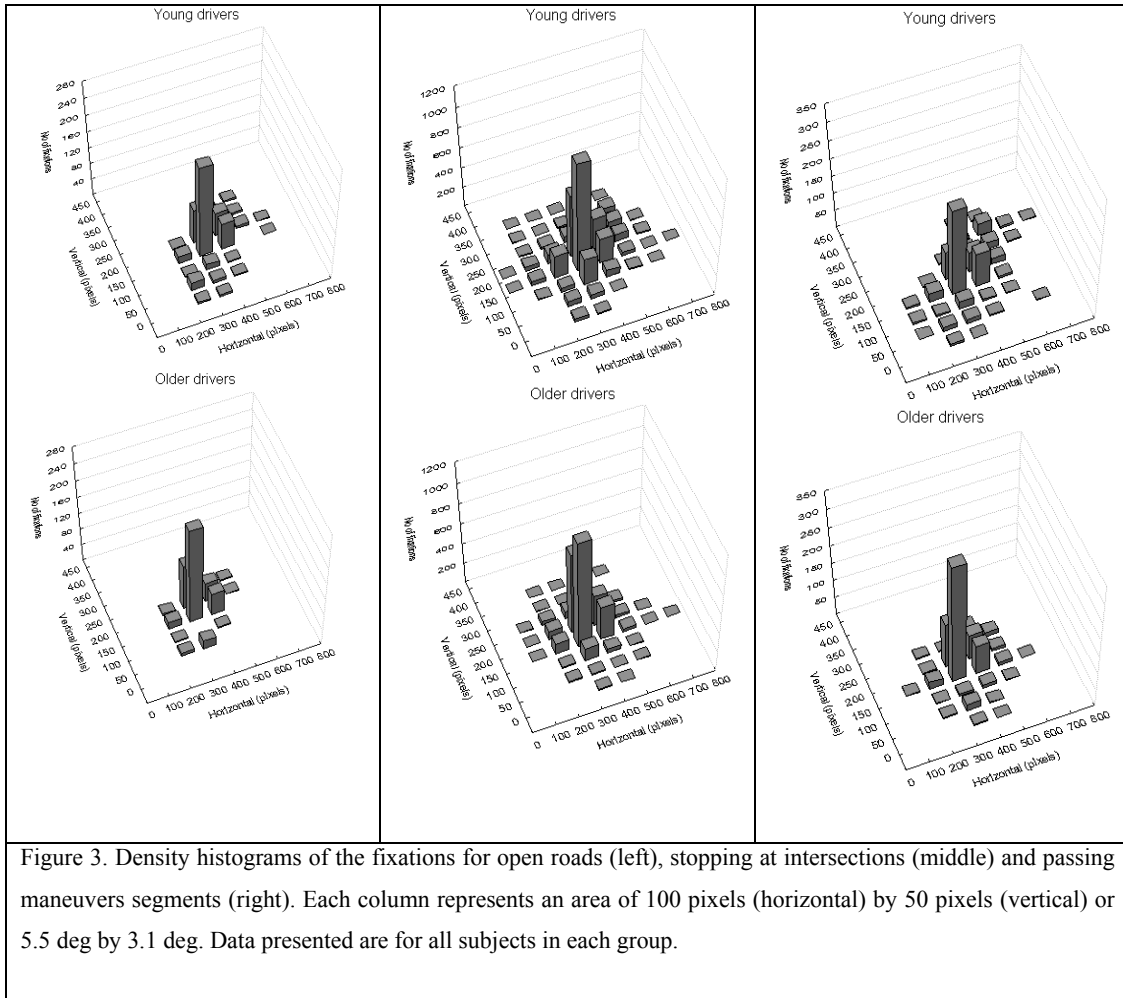


Figure 3. Density histograms of the fixations for open roads (left), stopping at intersections (middle) and passing maneuvers segments (right). Each column represents an area of 100 pixels (horizontal) by 50 pixels (vertical) or 5.5 deg by 3.1 deg. Data presented are for all subjects in each group.

Figure 3 illustrates dispersion of fixations for both groups. For each driving context, one can appreciate the more dispersed fixations for the younger than for the older drivers. Also, for the older drivers, there is a greater density of fixations around the center of the screen.

4. Discussion

The elderly tested in the present experiment were healthy and active drivers. Also, the driving conditions were as normal as possible and we did not present any contexts requiring emergency braking responses. Nevertheless, we were able to document subtle age-related differences in the gaze behavior of the participants. Compared to younger drivers, older drivers showed a reduced gaze amplitude and a reduced variance for the three driving contexts examined. Also, when the driving context was more complex (passing maneuvers), older drivers showed a smaller number of fixations/sec than younger drivers suggesting that older drivers did not sample the environment in the same manner as their

younger counterpart. These observations are important as the scenarios presented were not highly demanding driving contexts. Despite this fact, the differences suggest an age-related perceptual narrowing (or tunnel effect) that could be exacerbated when facing more complex driving maneuvers.

The smaller gaze amplitude and variance have sometimes been taken as illustrations of this phenomenon (perceptual narrowing). For instance, Rogé et al [22] reported that older drivers had a reduced ability to detect a stimulus presented in peripheral vision during a monotonous driving task consisting of following a vehicle in road traffic for a two-hour period. Several comparisons between novice and more experienced drivers also suggest the possibility of a perceptual narrowing phenomenon. For instance, Mourant and Rockwell [6] reported that novice drivers concentrated their fixations in a smaller area (smaller range of horizontal scanning) and sampled their mirrors less frequently than experienced drivers. More recently, Pollatsek et al [23] reported that novice drivers fixated risky features of simulated scenarios less often than young and older drivers. In one experiment, the ability to detect peripheral stimuli interacted with the complexity of contexts with novice drivers showing a reduced detection when potentially hazardous situations became visible in a video clip [Crundall 2005, reported in 5]. There are very few studies showing this effect with elderly drivers, however. When static traffic scenes are presented without specific search instructions, there are reports of age-related deficits [9, 10] with the elderly generally showing less accurate fixations taking more time to identify the presence of specific targets (traffic signs) in a scene. When video clips recorded from the drivers' perspective were presented, Underwood et al. [11] reported a lack of age difference in the scan pattern of older and younger drivers. Pollatsek et al [23] also reported that older and younger drivers fixated as often to risky features of simulated scenarios. This was not the case for novice drivers which showed a smaller percentage of trials for which they fixated risky features. Underwood et al [8] suggested that novice drivers have an incomplete mental model of the driving task, particularly in more complex driving contexts, which yields to a reduced inspection of dynamics events on demanding roadways. It is difficult to reconcile completely our observations of a smaller gaze amplitude (and reduced variance) for the elderly with those of Underwood et al. [11] and Pollatsek et al. [23]. There is a possibility that the presentation of specific hazardous events could have triggered particular

search strategies that, although they could be advantageous for driving, are not those normally adopted when driving. For instance, our level of alertness is always awakened after a hazardous event but this state of alertness is not always as high. By presenting several such situations in a limited time, one could artificially raise the level of alertness. This is reminiscent to what Poulton referred as a bias in quantifying judgments [24-26]. This is a possibility that should not be discarded too rapidly.

A limitation of our study is that we have not yet determined the specific patterns of fixations. Hence, it is not possible to determine what information was missed by older drivers by reducing their gaze amplitude and variance. We have analyzed the scan patterns for a few segments. For instance, the only accident observed occurred after an elderly driver omitted to glance at the red light. This, obviously, is anecdotal and a more detailed and rigorous analyses of the scan patterns could unravel age-related differences. The recent work of Pollatsek et al. [23] and Underwood et al. [8] suggests that identifying more precisely the gradual changes in the scan pattern, whether it is when learning to drive or through the normal aging process, could provide important insights for determining skilled from unskilled drivers.

References

1. Hayhoe, M., Ballard, D. (2005). Eye movements in natural behavior. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 188-94
2. Yarbus, A.L. (1967). Eye movements during perception of complex objects. IN: Riggs, L. A. (Ed.) *Eye movements and vision*. New York, Plenum Press.
3. Shinoda, H., Hayhoe, M.M., Shrivastava, A. (2001). What controls attention in natural environments? *Vision Research*, 41, 3535-45
4. Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124, 372-422
5. Land, M.F. (2006). Eye movements and the control of actions in everyday life. *Progress in Retinal and Eye Research*, 25, 296-324
6. Mourant, R.R., Rockwell, T.H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors*, 14, 325-335
7. Crundall, D., Underwood, G. (1998). The effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41, 448-458
8. Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., Crundall, D. (2003). Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, 46, 629-46
9. Maltz, M., Shinar, B. (1999). Eye movements of younger and older drivers. *Human Factors*, 41, 15-25
10. McPhee, L.C., Scialfa, C.T., Dennis, W.M., Ho, G., Caird, J.K. (2004). Age differences in visual search for traffic signs during a simulated conversation. *Human Factors*, 46, 674-85
11. Underwood, G., Phelps, N., Wright, C., van Loon, E., Galpin, A. (2005). Eye fixation scanpaths of younger and older drivers in a hazard perception task. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 25, 346-56
12. Hakamies-Blomqvist, L., Mynttinen, S., Backman, M., Mikkonen, V. (1999). Age-related differences in driving: Are older drivers more serial? *International Journal of Behavioral Development*, 23, 575-589
13. Cooper, P.J. (1990). Differences in accident characteristics among elderly drivers and between elderly and middle-aged drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 22, 499-508
14. Hauer, E. (1988) The safety of older persons at intersections. *Transportation in an aging society*. Washington, DC, Transportation Research Board.

15. Owsley, C., Ball, K., McGwin, G., Jr., Sloane, M.E., Roenker, D.L., White, M.F., Overley, E.T. (1998). Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults. *Journal of the American Medical Association*, 279, 1083-8
16. Hancock, P.A., Wulf, G., Thom, D., Fassnacht, P. (1990). Driver workload during differing driving maneuvers. *Accident Analysis and Prevention*, 22, 281-90
17. Teasdale, N., Cantin, V., Blouin, J., Simoneau, M., Desroches, G. (2004). Attentional demands while driving in a simulator: Effects of driving straights on open roads and when approaching an intersection. *Advances in Transportation Studies: An International Journal*, Special issue, 29-38
18. Teasdale, N., Cantin, V., Lavallière, M., Tremblay, M., Simoneau, M. (2006). Age-related attentional demands while driving in a simulator. 4th Annual STISIM Drive User Group Meeting, New Approaches to Simulation and the Older Operator. MIT (Massachusetts).
19. Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R. (1975). Mini-mental state. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 189-198
20. Verbaken, J.H. (1989). Contrast sensitivity testing with low contrast acuity charts: manufacturer's guide. Melbourne, Australia, Australian Vision Charts.
21. Allen, R.W., Rosenthal, T.J., Aponso, B.L., Klyde, D.H., Anderson, F.G., Hogue, J.R., Chrstos, J.P. (1997). A Low Cost PC Based Driving Simulator for Prototyping and Hardware-In-The-Loop Applications. SAE International Congress & Exposition,
22. Roge, J., Pebayle, T., Lambilliotte, E., Spitzenstetter, F., Giselbrecht, D., Muzet, A. (2004). Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, 44, 2737-44
23. Pollatsek, A., Narayanaan, V., Pradhan, A., Fisher, D. (2005). Using eye movements to evaluate a PC-based risk awareness and perception effects of driver age on risk perception in a driving simulator. *Human Factors*, 47, 840-52
24. Poulton, E. (1989). *Bias in quantifying judgments*. London, Laurence Erlbaum Associates.
25. Poulton, E.C. (1969). Bias in experimental comparisons between equipments due to the order of testing. *Ergonomics*, 12, 675-87
26. Poulton, E.C., Freeman, P.R. (1966). Unwanted asymmetrical transfer effects with balanced experimental designs. *Psychological Bulletin*, 66, 1-8

Chapitre 4 Comparaison de patron de recherche d'informations visuelles des conducteurs jeunes et âgés en conduite simulée

Cantin Vincent^{1,2}, Teasdale Normand^{2,3}, Lavallière Martin^{2,3}, Simoneau Martin^{2,3}

¹Université du Québec à Trois-Rivières, Département des sciences de l'activité physique, Trois-Rivières, Canada

²GRAME, Université Laval, Faculté de médecine, Division de kinésiologie, PEPS, Québec, Canada

³Centre de recherche du CHA – Axe perte d'autonomie et sciences neurologiques et Centre d'excellence sur le vieillissement - Hôpital Saint-Sacrement, Québec, Canada

Mots clés : vieillissement, conduite, mouvements oculaires

Résumé

L'étude des patrons de recherche d'informations et des comportements oculaires s'est avérée un moyen efficace pour différencier certains groupes de conducteur. Les mouvements oculaires de conducteurs jeunes et âgés ont été enregistrés à l'aide d'un oculomètre (ASL modèle 510) alors qu'ils conduisaient un simulateur de conduite. Les participants devaient parcourir un scénario continu de 26.4 km composé de sections de conduite urbaines et rurales. Les variables usuelles des mouvements oculaires telles que le nombre de fixation, le nombre de fixation par seconde, la durée des fixations et la variabilité du balayage horizontale ont été calculées. De plus, les mouvements oculaires ont été analysés sur la base des objets et des régions de la scène visuelle fixés. Toutes ces variables ont été analysées pour trois contextes de conduite : a) conduite en ligne droite à vitesse constante, b) approche d'une intersection où le conducteur devait s'immobiliser, c) dépassement d'un véhicule lent. À moins d'une erreur de la part du conducteur, le scénario n'incluait aucune manœuvre d'urgence. Les séquences de fixations ont été extraites et analysées. Dans l'ensemble, les personnes âgées ont montré une diminution du champ visuel mais les comportements oculaires et les stratégies de recherche d'informations étaient similaires à ceux des jeunes conducteurs. L'une des explications possibles pourrait venir de la bonne connaissance qu'ont les personnes âgées de l'environnement et des situations de conduite.

Introduction

Au cours des dernières années, l'interprétation de la relation en forme de U entre l'âge des conducteurs et la fréquence des accidents de la route par unité de distance a fait l'objet d'un débat intéressant. Alors que le vieillissement et la perte de capacités physiques et cognitives qui s'y rattache étaient visés comme les principaux responsables de l'augmentation des accidents en fin de courbe, certains auteurs [1-3] ont montré que cette augmentation était principalement causée par un biais expérimental associé au bas kilométrage parcouru par les personnes âgées. Ce biais signifie que les conducteurs qui parcourent plus de kilomètres annuellement ont une fréquence d'accident par kilomètre moins élevée que ceux qui en parcourent moins. Puisque les personnes âgées conduisent généralement moins de kilomètres annuellement, ils ont une fréquence d'accident par unité de distance plus élevée que le reste de la population qui en parcourt plus. Néanmoins, il ne faut pas faire abstraction du fait que les conducteurs âgés sont surreprésentés dans les accidents survenant lors de situations complexes de conduite comme le virage à gauche, le passage d'une intersection et les manœuvres de dépassement [4, 5]. De plus, ces accidents sont souvent causés par une violation du Code de la route de la part des conducteurs âgés [6]. Ces événements de conduite requièrent du conducteur des ressources attentionnelles importantes pour la prise de décisions rapides, des capacités visuelles suffisantes pour la perception de l'environnement et des stratégies de recherche d'informations efficaces pour l'identification des dangers potentiels. Ces caractéristiques prises individuellement ou en combinaison ont le potentiel de nuire à la performance du conducteur et d'augmenter le risque d'accident. Le lien causal entre la dégénérescence d'une fonction ou d'un sens et l'augmentation du risque d'accident n'est pas facile à établir en raison du caractère multifactoriel et imprévisible de l'accident. La démonstration d'une modification de la performance est possiblement la meilleure stratégie pour montrer l'effet de la modification d'une variable (dégénérescence ou autre) sur la conduite.

L'augmentation de la charge cognitive associée à la réalisation d'une tâche secondaire augmente le risque d'accident de la route et modifie la performance du conducteur [7, 8]. Ces modifications de la performance amènent des comportements à risque pouvant mener à des pertes de contrôle et à des manœuvres que les autres conducteurs peuvent difficilement

anticiper. La conduite d'une automobile n'est pas une tâche automatique. Récemment, nous avons montré [8] que la simple tâche de conduite en ligne droite fait augmenter la charge cognitive des conducteurs considérablement et que ces résultats sont amplifiés lors de situations de conduite complexes comme le passage d'une intersection ou une manœuvre de dépassement. Dans cette même étude, les personnes âgées ont montré une augmentation de la charge cognitive beaucoup plus importante que les jeunes adultes dans tous les contextes de conduite et les différences observées lors des manœuvres de dépassement ont même été exacerbées.

La vision est la méthode dominante d'extraction de l'information en conduite et la relation entre la dégénérescence des qualités visuelles et l'augmentation du risque d'accident a été étudiée à de nombreuses reprises [9-13]. La majorité des qualités visuelles diminuent à partir de 50 ans [14] et les atteintes visuelles comme les cataractes, la dégénérescence de la macula et l'apparition de glaucomes en sont une cause importante [15]. Toutefois, la dégénérescence des fonctions visuelles ne permet pas clairement d'expliquer l'augmentation du risque d'accident associée au vieillissement [9-13]. Ball et Owsley [13] et par la suite Underwood et al. [16] ont observé et proposé qu'en absence d'une pathologie visuelle ou d'une limitation fonctionnelle, les conducteurs âgés ne constituent pas un risque plus important pour la sécurité routière que les autres groupes de conducteurs.

Les fixations et stratégies oculaires peuvent fournir des indications importantes sur les informations perçues et la charge attentionnelle [17]. Les personnes âgées sont généralement beaucoup moins performantes dans les tâches de recherche d'informations visuelles et de détection de cible [18-20] et le constat général est que le vieillissement amène une dégradation des processus de perception [21-23]. Par exemple, Maltz et Shinar [23] ont observé que les personnes âgées avaient des stratégies de recherche d'informations et des comportements oculaires différents des jeunes adultes lors de la recherche de numéros sur des photographies de scènes de conduite. Les personnes âgées ont montré des épisodes de recherche plus longs, un nombre de fixations oculaires plus élevé, des déplacements de l'axe du regard plus courts et des stratégies de recherche d'informations différentes où elles orientent leur regard plus souvent sur certaines zones de la scène et revisitent certaines régions contrairement aux jeunes adultes. Toutefois, les différences

entre les personnes âgées et les jeunes adultes semblent beaucoup moins importantes lorsque la population de personnes âgées évaluée est relativement jeune, en bonne santé et asymptomatique [16, 24, 25]. De plus, la nature de la tâche et la connaissance de l'environnement améliore la performance des personnes âgées [16, 25].

Tous ces résultats nous permettent de croire que les stratégies oculaires des conducteurs âgés en bonne santé dans un contexte de conduite normal seront très similaires à celles adoptées par les conducteurs plus jeunes. Malheureusement, aucune étude n'a examiné les stratégies oculaires des conducteurs âgés dans un contexte de conduite réelle ou simulée. Avec pour objectif de standardiser l'environnement de conduite et les stimuli présentés aux participants, Underwood et al. [16] ont opté pour la présentation de séquences vidéo de conduite. Toutefois, la conduite d'une automobile est une tâche plus complexe que le visionnement d'une séquence vidéo. Puisque l'augmentation de la charge cognitive est associée à une modification des stratégies oculaires [26] et que la conduite est associée à une augmentation de la charge cognitive [8], il est probable que les résultats observés par Underwood et al. [16] lors du visionnement de séquences vidéo ne soient pas transférables à la conduite simulée et réelle. En contrepartie, Pradhan et al. [25] ont soumis les participants de leur étude à des contextes de conduite simulée à risque et ont observé que les personnes âgées étaient plus performantes que les conducteurs plus jeunes. Toutefois, l'objectif étant d'évaluer si les conducteurs fixaient du regard ou non les éléments à risque, les stratégies oculaires mises en place pour y parvenir n'ont pas été analysées. Ces deux études ont observé que les personnes âgées étaient aussi performantes sinon meilleures que les jeunes adultes à la réalisation des tâches de recherche d'informations imposées. Ces résultats peuvent sembler surprenants compte tenu du ralentissement général observé avec le vieillissement. L'hypothèse la plus répandue pour expliquer ces résultats est que la représentation cognitive qu'ont les conducteurs âgés de l'environnement de conduite est enrichie par l'expérience et les nombreuses situations de conduite rencontrées [16].

L'objectif principal de cette étude est de vérifier si les comportements oculaires et les stratégies visuelles des personnes âgées, en bonne santé et asymptomatiques, sont similaires à ceux des jeunes adultes dans des contextes de conduite simulée nécessitant différents niveaux de charge cognitive. Étant donné que la charge cognitive des personnes âgées est

plus importante que celle des jeunes adultes pour un contexte de conduite donné et que les stratégies visuelles sont affectées par la charge cognitive, nous croyons que les personnes âgées montreront des stratégies et des comportements oculaires différents pour certains contextes de conduite complexes telles que les manœuvres de dépassement, mais que ces modifications seront moins importantes ou même inexistantes pour les contextes simples.

Méthode

Participants : Dix jeunes adultes (moyenne = 24 ans, étendue =20-31) et 11 personnes âgées (moyenne = 69 ans, étendue =65-75) ont participé à l'étude. Les jeunes adultes ont été recrutés sur une base volontaire parmi les étudiants de l'Université Laval. Les personnes âgées ont été recrutées par la publication d'une annonce dans les journaux locaux ou par l'entremise de regroupements de personnes âgées. Tous les participants devaient posséder un permis de conduire valide, détenir son permis depuis plus de trois ans et être un conducteur actif (au minimum avoir conduit 5000 km dans la dernière année). Tous les participants ont signé un consentement éclairé en accord avec les politiques du comité d'éthique de l'Université Laval.

Tous les participants ont rempli un questionnaire général incluant des éléments sur leurs habitudes de conduite (expérience de conduite, fréquence de conduite, accident dans la dernière année) et sur leur état de santé général (problème neurologique ou musculosquelettique, usage de médicament, consommation d'alcool). Les personnes âgées ont mentionné avoir une expérience de conduite plus importante que les jeunes adultes (42.5 vs 7.0 années d'expérience pour les personnes âgées et les jeunes adultes, respectivement ($F(1,16)=377.10$; $p<0.001$)). La consommation d'alcool par semaine était similaire pour les deux groupes (2.8 vs 3.1 consommations par semaine pour les personnes âgées et les jeunes adultes, respectivement ($F(1,16)=0.05$; $p=0.83$)). La consommation d'au moins un médicament était supérieure pour les personnes âgées (75 % des personnes âgées consommaient au moins un médicament régulièrement contre 10 % pour les jeunes conducteurs ($U(8,10)=14$; $p<0.05$)). Les médicaments consommés par les participants âgés leur avaient été prescrits pour des problèmes liés au vieillissement tels que l'hypertension artérielle, l'arthrite, l'hypercholestérolémie et l'insuffisance cardiaque.

Les participants se sont également soumis à une batterie de tests cognitifs et visuels administrée par un professionnel de recherche entraîné. Le Mini Mental State Examination (MMSE) a été utilisé pour évaluer les fonctions cognitives des sujets. Tous les participants ont obtenu un résultat égal ou supérieur à 27 et aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes ($F(1,16)=2.96$; $p=0.10$). L'acuité visuelle a été mesurée par l'entremise du test de Snellen [27] à contraste faible et haut. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes pour ces deux tests (Snellen contraste faible ($F(1,16)=3.32$; $p=0.09$); Snellen contraste fort; ($F(1,16)=1.91$; $p=0.19$)).

Le simulateur de conduite du Groupe de Recherche en Analyse du Mouvement Humain et Ergonomie (GRAME) de l'Université Laval est composé de la structure d'une berline à transmission automatique de taille moyenne interfacée avec le logiciel de simulation STISIM (STISIM DRIVE 2.0 de Systems Technology Inc.). Ce logiciel offre un environnement visuel en trois dimensions et permet la programmation de scénarios et de situations de conduite réalistes. Les contrôles de la berline ont été instrumentés pour permettre au conducteur d'interagir avec l'environnement simulé. Les données provenant des contrôles du véhicule sont enregistrées à une fréquence de 30 Hz (Computer Measurement PCI DAS08, 12-bit A/D). Un vidéoprojecteur (Hitachi CP-X275) projette les scénarios sur un mur blanc de 2.00 m de large par 1.45 m de haut ce qui représente un champ de vision de 40 ° horizontalement et 30 ° verticalement pour le participant alors qu'il est assis au volant du simulateur. Le centre de l'écran (ligne d'horizon) est positionné à la hauteur des yeux et la fréquence de rafraîchissement de la scène varie entre 20 et 30 Hz en fonction de la capacité de l'ordinateur à générer l'environnement. Pour diminuer les sensations associées aux maux de simulateur, la température du local du simulateur est maintenue à environ 17 °C. Avant de commencer l'expérimentation en simulateur, chacun des participants a reçu pour consignes d'avertir l'expérimentateur s'il se sentait mal et qu'il pouvait se retirer de l'étude en tout temps sans préjudice.

L'oculomètre (ASL modèle 510, Cambridge, MA) utilisé permet d'enregistrer les mouvements oculaires d'un oeil à une fréquence de 60 Hz. Puisque cet appareil est positionné sur le tableau de bord du simulateur, le participant est libre de déplacer et pivoter la tête. Cet appareillage permet de superposer l'axe du regard à la scène visuelle filmée par

une deuxième caméra se trouvant à l'arrière du conducteur, à proximité du vidéoprojecteur. Les séquences vidéo ainsi enregistrées permettent de réaliser une analyse qualitative des fixations oculaires.

Après avoir rempli le questionnaire et complété les évaluations cliniques, le participant était invité à prendre place dans le simulateur et à ajuster son siège comme s'il se trouvait dans son propre véhicule. Par la suite, l'expérimentateur lui transmettait les consignes de base et les informations nécessaires au fonctionnement du simulateur. Une fois les consignes transmises, le participant devait parcourir un scénario de 12 km. Ce scénario d'adaptation était composé d'une variété de situations de conduite qui permettaient au conducteur de se familiariser avec le simulateur et tout particulièrement avec ses contrôles (volant, accélérateur et frein). À la suite du scénario d'adaptation, une pause de 5 minutes était accordée au participant. Une personne âgée a profité de cette pause pour se retirer de l'étude en raison de maux de simulateur. Les résultats subséquents ne tiennent pas compte de ce sujet.

Par la suite, l'expérimentateur procédait à la calibration de l'oculomètre. La procédure de calibration utilisée consiste à demander au sujet de fixer successivement neuf points couvrant l'ensemble de la scène visuelle. Une fois la calibration réussie, le participant pouvait parcourir le scénario expérimental de 26 km qui comprenait des sections de routes urbaines et rurales. L'ensemble du scénario incluait 18 intersections (lumières rouges, lumières vertes et arrêts) disposées aléatoirement tout au long du scénario de conduite. En raison du champ de vision horizontal limité de notre simulateur (40°), aucun virage à 90° n'a été introduit dans le scénario. L'ordre de présentation des événements n'a pu être modifié d'un sujet à l'autre puisque nous aurions été dans l'impossibilité d'exposer les conducteurs à un débit de circulation similaire. Quelques courbes peu prononcées (rayon de 120 m et plus) et quelques pentes douces ont été intégrées au scénario pour diminuer la monotonie de la conduite. Une signalisation indiquant les limitations de vitesse a été disposée tout au long du scénario. La limitation maximale de vitesse était de 50 ou 90 km/h selon le contexte de conduite. Les participants recevaient pour consignes de conduire aussi normalement que possible tout en respectant le Code de la route en vigueur au Québec. Pour nous assurer que les participants avaient respecté la consigne, nous avons calculé le

pourcentage de la distance totale parcourue à une vitesse supérieure à la vitesse affichée. Au total, les jeunes conducteurs ont conduit à une vitesse supérieure à la vitesse affichée pour 1.9 % de la distance totale parcourue contre 1.1 % pour les conducteurs âgés. Cette différence n'est pas statistiquement significative ($F(1,16)=1.27$, $P=.276$).

Les fixations oculaires ont été obtenues à partir des données des mouvements oculaires. Pour qu'une fixation soit identifiée, l'axe du regard devait se trouver dans une région donnée pour un intervalle de temps déterminé. Un intervalle de temps minimum de 100 ms et une tolérance de position de $\pm 1^\circ$ ont été utilisés. Le critère de tolérance de 1° a été proposé par Falkmer et Gregersen [28] et correspond à l'amplitude de la vision focale autour d'un point fixe. Les fixations oculaires n'ont pu être calculées pour deux participants du groupe des personnes âgées en raison de la mauvaise qualité des données acquises par l'oculomètre. Le premier sujet portait des verres sans traitement antireflet qui réfléchissaient la lumière infrarouge de la caméra et rendaient impossible la détermination de l'axe du regard. Le deuxième sujet avait une ouverture oculaire insuffisante et la paupière inférieure obstruait la pupille de l'œil rendant son identification impossible. Pour toutes ces raisons, les deux participants ont été exclus de toutes les analyses présentées dans la section résultat.

Une approche quantitative a initialement permis de calculer, pour chacun des événements de conduite, le nombre de fixations, le nombre de fixations par seconde, la durée des fixations et la variance de la position verticale et horizontale des fixations. Par la suite, une analyse qualitative a été réalisée. Chacune des séquences d'images contenant une fixation ont été analysées à l'aide d'une interface développée à partir de la plateforme Matlab (Mathworks Inc, v7.01). Cette interface permettait l'affichage des fixations sur les images de la scène visuelle correspondantes et d'attribuer manuellement à chacune des fixations un contexte de conduite et un type d'objet. La région de la scène observée était enregistrée automatiquement en fonction de la position de la fixation. Au total, trois contextes (ligne droite, dépassement et intersection), trois types d'objet (route, environnement de la route et utilisateurs de la route) et 11 régions différentes pouvaient être attribués à une fixation. Les contextes ligne droite consistaient en 16 sections de conduite en ligne droite à vitesse quasi constante. Les contextes intersections étaient composés de 15 intersections (lumières

rouges ou arrêts) où le conducteur devait s'immobiliser. Chacun de ces événements débutait dès que l'intersection apparaissait dans la scène visuelle et se terminait au moment où le conducteur immobilisait le simulateur à l'intersection (vitesse= 0 ou vitesse minimum). Les contextes manœuvres de dépassement étaient composés de 5 situations où le conducteur devait dépasser un véhicule plus lent. Tous les événements constituant les contextes de conduite étaient répartis aléatoirement dans le scénario de conduite.

La codification proposée par Underwood et al. [16] a été utilisée pour regrouper les objets en trois catégories:

- Environnement routier (E) : Les panneaux de circulation, les jonctions de la route, la signalisation, les bâtiments, les commerces, le sol en bordure de la route, etc.
- Route (R): La route, les marques et les lignes sur la route
- Utilisateur de la route (U) : Voitures, piétons, cyclistes, camions, autobus, etc.

La codification de la zone a été effectuée en fonction de la position de la fixation sur la scène visuelle (figure 1) qui a été subdivisée en 11 régions distinctes (loin-gauche (1), loin-centre (2), loin-droit (3), centre-gauche (4), centre-centre (5), centre-droite (6), proche-gauche (7), proche-centre (8), proche droit (9), odomètre (10) et rétroviseur arrière (11)). Les fixations effectuées à l'extérieur de ces zones n'ont pas été considérées.

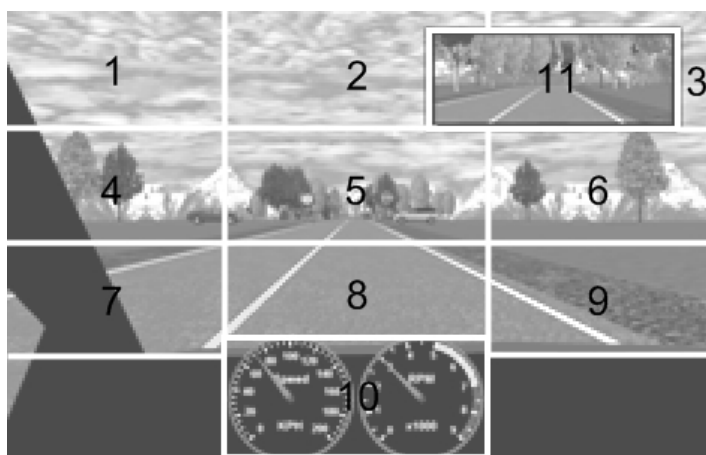


Figure 1 : Onze régions prédéfinies de la scène visuelle

La méthodologie utilisée pour la compilation des séquences de 2 fixations successives (transitions) a été développée par Liu [29] qui a observé des séquences spécifiques de mouvements oculaires lors de manœuvres de conduite comme le virage à gauche et les dépassements. Cette méthodologie a par la suite été reprise par Underwood et al. [16, 30] pour comparer les stratégies oculaires de conducteurs novices et expérimentés et de conducteurs jeunes et âgés. À partir des données de fixations, une matrice Markov de premier ordre a été compilée pour chacune des combinaisons groupe/contextes de conduite. Ce type de matrice fournit une table des probabilités de chacune des transitions réalisées à partir de chacune des combinaisons objet-région. Un test binomial a permis, par la suite, de calculer le score Z associé à chacune des transitions. Le test binomial assume que chacune des combinaisons objet-région a la même probabilité d'être inspectée suite à une fixation faite sur une combinaison objet-type donnée. Puisque nous nous intéressons uniquement aux transitions entre les différentes zones, les séquences de deux fixations survenant dans une même zone et sur le même type d'objet n'ont pas été comptabilisées (7 % des séquences de deux fixations). Pour des raisons de résolution, toutes les fixations effectuées sur le rétroviseur arrière se sont vues attribuer la route (R) comme objet. De la même façon, toutes les fixations effectuées sur l'odomètre se sont vues attribuer l'environnement routier (E) comme objet. Ainsi la probabilité de transition à partir d'une combinaison objet-zone vers toute autre combinaison est de $1/25$. Cette procédure permet d'identifier les transitions qui sont statistiquement surreprésentées (score Z supérieur à 1.96) parmi toutes les transitions possibles.

Résultats

Le nombre de fixations effectuées est utilisé régulièrement comme indice de la demande visuelle et peut même être employé comme indice de la charge cognitive dans certaines tâches spécifiques [24]. Puisque le temps pris par chacun des conducteurs pour parcourir les événements était variable (modulé par la vitesse de conduite), nous avons normalisé le nombre de fixations en divisant cette variable par le temps pris par les participants pour parcourir l'événement. Ces résultats sont présentés à la fin de ce paragraphe. Au total, 20173 fixations ont été effectuées par les participants. Les personnes âgées ont contribué d'une façon significativement plus élevée avec en moyenne 1229.4 fixations par conducteur

comparativement à 1033.8 fixations pour les conducteurs plus jeunes ($F(1,16)=9.09$, $P<.01$). La figure 2 présente les résultats de l'ANOVA à mesures répétées effectuée sur le nombre de fixations par seconde. L'effet groupe tout comme l'effet contexte de conduite et l'interaction entre ces deux facteurs n'ont pas atteint le seuil de signification statistique ($P_s<.05$).

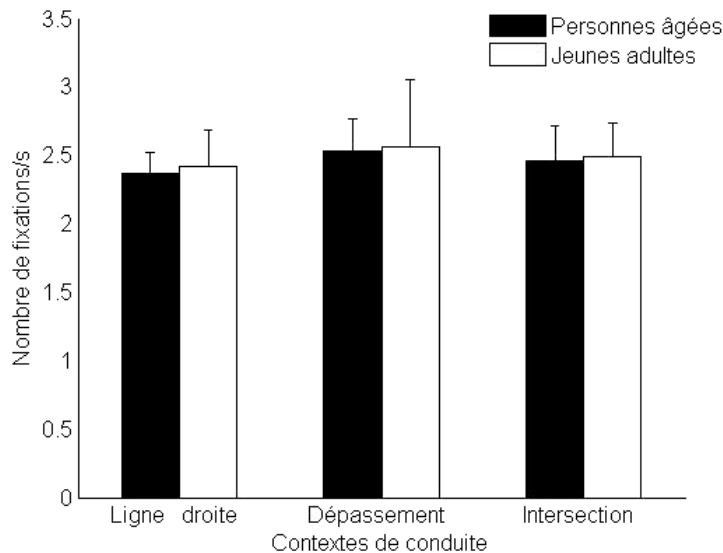


Figure 2 : Nombre de fixations par seconde en fonction du contexte de conduite.

La durée moyenne des fixations oculaires correspond au temps nécessaire pour le traitement de l'information disponible [24, 26]. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes. Les personnes âgées se sont comportées comme les jeunes adultes ce qui suggère qu'elles n'ont pas éprouvé de difficultés supplémentaires à extraire l'information visuelle de la scène de conduite (348 ms vs 371 ms pour les jeunes conducteurs et les personnes âgées respectivement; $F(1,16)=0.98$, $P=0.34$). Toutefois, une différence a été observée entre les contextes de conduite ($F(2,32)=6.33$, $P<0.01$). Une analyse posthoc (Fisher LSD) a montré que la durée des fixations était significativement plus longue pour le contexte ligne droite que pour les deux autres contextes (ligne droite = 380 ms; dépassements = 353 ms; intersections = 345 ms, $P_s<0.05$). La différence entre le contexte dépassement et le contexte intersection ne s'est pas avérée significative ($P=0.42$).

La variance des coordonnées des fixations oculaires selon les axes horizontal et vertical a été évaluée pour l'ensemble des contextes de conduite. Les coordonnées des fixations oculaires sont acquises en pixels, mais elles ont été converties en degrés à l'aide des ratios vertical et horizontal de conversion pixels vs degrés. Ces ratios sont calculés lors de la procédure de calibration de l'oculomètre et sont uniques à chacun des sujets en fonction de leur position par rapport à la scène visuelle. Puisqu'il s'agit d'un calcul de variance, l'écart type sur les coordonnées des fixations a été calculé et élevé au carré. La variance est utilisée comme indicateur de l'étendue du balayage visuel effectué [26, 31]. Plus la variance est élevée et plus le balayage visuel est important. Une MANOVA à mesures répétées (Groupe x Contexte de conduite x Orientation de la variance) a été effectuée sur la variance horizontale et verticale de la position des fixations pour étudier l'effet de l'âge et du contexte de conduite sur l'amplitude du champ visuel des conducteurs. Un effet groupe a été observé. Les personnes âgées ont montré une variance de la position des fixations moins importante que les jeunes conducteurs (67.1 et 48.3 degrés carrés pour les jeunes conducteurs et les personnes âgées respectivement). Cet effet groupe est significatif ($F(1,16)=8.50$; $P<.05$). L'effet contexte de conduite n'a pas été significatif ($F(2,32)=0.16$; $P=.85$). Aucune interaction significative entre les facteurs n'a été observée ($P_s>.05$). Pour étudier la spécificité de l'effet, des ANOVA à mesures répétées ont été effectuées indépendamment pour la variance verticale et horizontale des fixations oculaires. L'analyse n'a montré aucune différence significative selon l'axe vertical (figure 3). Les deux groupes se sont comportés d'une façon similaire pour chacun des contextes de conduite (ligne droite : 34.6 vs 40.7 degrés carrés, dépassement : 26.5 vs 39.4 degrés carrés, intersection : 29.9 vs 35.1 degrés carrés, pour les personnes âgées et les jeunes adultes respectivement; $P_s>.05$). La figure 4 présente les résultats de l'ANOVA à mesures répétées effectuée sur la variance horizontale des fixations. Un effet groupe significatif a été observé alors que les conducteurs plus jeunes ont montré une variance plus importante que les conducteurs âgés ($F(1,16)=6.30$; $P=.02$). L'effet contexte de conduite et l'interaction entre les facteurs groupe et contexte de conduite n'ont pas atteint le seuil de signification ($P_s>.05$).

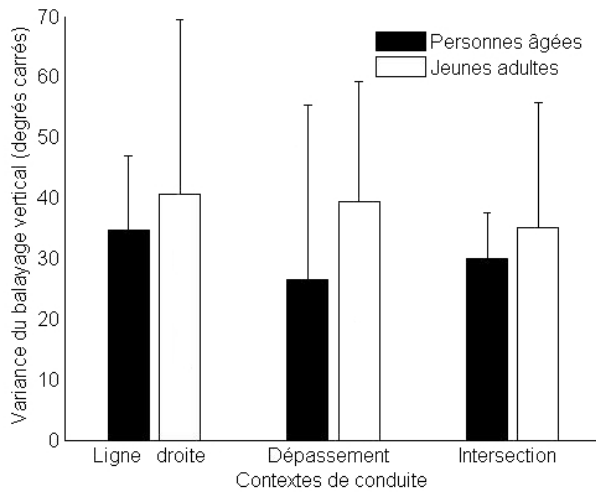


Figure 3 : Variance des fixations oculaires selon l'axe vertical.

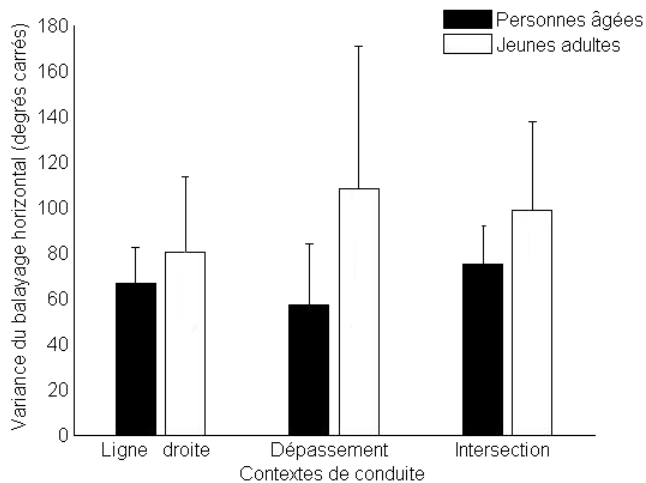


Figure 4 : Variance des fixations oculaires selon l'axe horizontal.

L'analyse image par image a permis le calcul du temps total d'inspection visuelle par zone, par objet et pour chacun des environnements de conduite. Le temps total a été normalisé en fonction du temps total d'inspection par contexte de conduite pour chacun des groupes de sujets. Le tableau 1 présente les résultats par région, par objet, par contexte de conduite et par groupe de sujets. Une ANOVA à deux facteurs nous a permis de comparer les pourcentages de temps d'inspection effectués par chacun des groupes pour chacune des régions de fixation de chacun des environnements de conduite. En raison du nombre important de tests réalisés, seules les différences significatives à un seuil de $P < .05$ sont

rapportées ici. Après exclusion des régions peu fréquentées (moins de 2.5 % des fixations pour un contexte de conduite), 2 régions ont montré des différences entre les 2 groupes. La première différence a été observée dans le contexte dépassement où les personnes âgées ont montré une proportion plus importante du temps d'inspection sur un utilisateur dans la région n° 5 (33.7 % vs 13.5 % pour les personnes âgées et les jeunes adultes respectivement; $F(1,16)=8.72$, $P<0.01$). La deuxième différence est survenue dans le contexte intersection où les utilisateurs se trouvant dans la région n° 6 ont attiré le regard des jeunes conducteurs pour une proportion plus importante de temps (2.0 % vs 3.9 % pour les personnes âgées et les jeunes adultes respectivement; $F(1,16)=5.10$, $P<0.05$).

| | Jeunes adultes | | | Personnes âgées | | |
|------------------------------|----------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|
| | Ligne droite | Dépassement | Intersection | Ligne droite | Dépassement | Intersection |
| Route | | | | | | |
| R1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| R2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| R3 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| R4 | 0.7 | 1.4 | 1.0 | 0.5 | 0.3 | 0.7 |
| R5 | 57.0 | 52.3 | 51.2 | 55.1 | 50.6 | 54.1 |
| R6 | 1.3 | 2.0 | 0.4 | 1.1 | 1.1 | 0.5 |
| R7 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.0 | 0.2 |
| R8 | 0.8 | 0.0 | 1.6 | 0.1 | 0.2 | 0.1 |
| R9 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| R10 | 6.3 | 5.0 | 3.0 | 3.1 | 1.7 | 0.9 |
| R11 | 2.4 | 9.6 | 2.5 | 1.8 | 3.8 | 1.6 |
| Total R | 69.0 | 71.7 | 60.3 | 62.3 | 57.7 | 58.1 |
| Environnement routier | | | | | | |
| E1 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| E3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E4 | 0.5 | 0.2 | 1.2 | 0.9 | 0.2 | 1.0 |
| E5 | 13.4 | 7.5 | 14.5 | 18.1 | 5.0 | 23.1 |
| E6 | 1.8 | 2.5 | 1.8 | 1.3 | 1.3 | 1.1 |
| E7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E10 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| E11 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total E | 15.9 | 10.3 | 17.9 | 20.3 | 6.5 | 25.4 |
| Utilisateur | | | | | | |
| U1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U4 | 0.5 | 0.2 | 2.0 | 0.5 | 0.1 | 1.5 |
| U5 | 12.5 | 13.5 | 15.7 | 15.9 | 33.7 | 12.9 |
| U6 | 1.7 | 3.9 | 3.9 | 0.8 | 1.9 | 2.0 |
| U7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U10 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| U11 | 0.3 | 1.3 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total U | 15.1 | 18.9 | 21.7 | 17.2 | 35.7 | 16.4 |

Tableau 1 : Temps d'inspection normalisé pour chacune des régions, chacun des objets et chacun des contextes de conduite.

Lors d'une deuxième analyse, nous avons regroupé les zones et avons comparé la proportion des temps d'inspections accordées à chacun des objets (route, environnement et utilisateur) pour chacun des contextes de conduite par chacun des groupes. Pour chacun des trois contextes de conduite, les deux groupes ont accordé une proportion de temps d'inspection similaire aux trois types d'objets présents dans l'environnement (figure 5). Une seule différence significative a été observée dans le contexte dépassement où les personnes âgées ont alloué une proportion plus importante de temps aux utilisateurs que les jeunes adultes ($F(1,16)=4.62, P<0.05$). Ce résultat confirme ce qui avait été observé lors de l'analyse individuelle des régions.

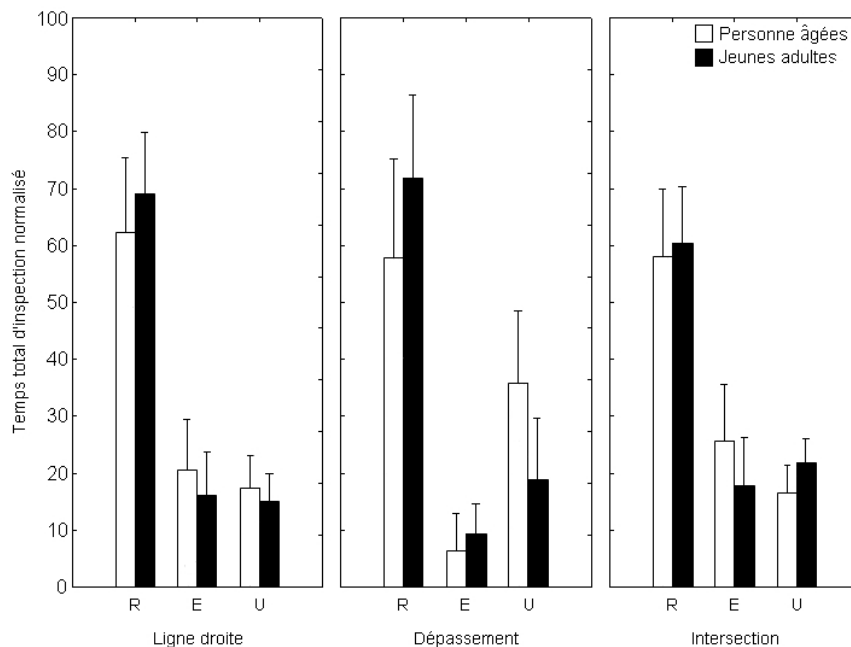


Figure 5 : Proportion du temps d'inspection accordée aux trois types d'objets en fonction du contexte de conduite.

Le tableau 2 présente les séquences de fixation qui sont significatives à un seuil de 0.05 pour chacun des deux groupes et pour les trois contextes de conduite. De nombreuses séquences de fixations ont été observées pour le contexte de conduite ligne droite, mais dans l'ensemble, les deux groupes se sont comportés d'une façon similaire. Deux séquences uniques aux jeunes conducteurs ont été notées. La première avait pour point d'origine la route au centre de la scène visuelle et se terminait sur l'odomètre (R5-R10). La

deuxième débutait sur le rétroviseur arrière du véhicule et se terminait sur la route au centre de la scène visuelle (R11-R5). La seule fixation unique effectuée par les personnes âgées débutait par une fixation à gauche sur la route et se terminait par une fixation au centre de la scène sur la route (R4-R5).

| Objet initial | Jeunes adultes | | | Personnes âgées | | |
|-----------------------|--|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------------------|
| | Ligne droite | Dépassement | Intersection | Ligne droite | Dépassement | Intersection |
| Route | R5-R10 R5-E5 R5-U5 R10-R5 R11-R5 | | R5-E5 R5-U5 R10-R5 | R4-R5 R5-E5 R5-U5 R10-R5 | R5-U5 | R4-R5 R5-E5 R5-U5 |
| Environnement routier | E5-R5 | | E5-R5 E5-U5 | E5-R5 | | E5-R5 |
| Utilisateur | U5-R5 | | U5-R5 U5-E5 U6-R5 U6-U5 | U5-R5 | | U5-R5 U5-E5 U6-U5 |

Tableau 2 : Séquences de deux fixations surreprésentées ($p < 0.05$) pour chacun des contextes de conduite et des types d'objet fixé.

Les personnes âgées n'ont montré qu'une seule séquence significative pour le contexte dépassement. Cette séquence consistait à fixer la route au centre de la scène visuelle et à faire suivre cette fixation par une fixation sur un utilisateur se trouvant également au centre de la scène (R5-U5). Aucune séquence significative n'a été observée pour les jeunes conducteurs.

Le contexte intersection est celui où le plus grand nombre de séquences de fixations significatives ont été observées pour les deux groupes de sujets. Toutes les séquences significatives se sont terminées au centre de la scène visuelle ce qui montre l'importance de garder le regard droit devant pour ce contexte de conduite. Les jeunes adultes ont montré trois séquences uniques contre une seule pour les personnes âgées. La première séquence unique des jeunes adultes avait pour point de départ l'odomètre et se terminait au centre de la scène avec les yeux sur la route (R10-R5). La deuxième séquence unique des jeunes adultes débutait par une fixation sur un objet de l'environnement routier situé au centre de la scène et se terminait par une fixation sur un utilisateur au centre de la scène visuelle (E5-U5). Finalement, la troisième séquence débutait par une fixation dans la partie centre-droit

de la scène sur un utilisateur et se terminait par une fixation sur la route au centre de la scène (U6-R5). La seule fixation unique effectuée par les personnes âgées débutait par une fixation à gauche sur la route et se terminait par une fixation au centre de la scène sur la route (R4-R5). Cette situation peut, par exemple, correspondre à une intersection en forme de T où le conducteur jette un coup d'œil sur la route transversale avant de ramener son regard droit devant lui sur la route.

Discussion

Cette étude avait pour objectif d'étudier les comportements oculaires des conducteurs âgés en bonne santé et asymptomatiques dans un contexte dynamique de conduite. L'environnement simulé a été privilégié à la conduite réelle pour contrôler la présentation des stimuli. Le scénario de conduite était composé de trois contextes de conduite nécessitant les ressources attentionnelles à différents niveaux [8]. Notre hypothèse de départ suggérait que les conducteurs âgés allaient montrer des comportements oculaires semblables à ceux des jeunes conducteurs dans les contextes simples de conduite, mais que ces comportements allaient être différents et plus stéréotypés pour les contextes de conduite complexes.

L'analyse du nombre de fixations par seconde et de la durée des fixations a montré peu de différence significative entre les deux groupes. Toutefois, un rétrécissement général du champ visuel, mesuré à partir de la variance de la position des fixations oculaires, a été observé chez les personnes âgées. Cet effet de « vision tunnelaire » a déjà été observé chez les personnes âgées lors de différentes tâches expérimentales [18-20, 23, 32, 33]. Plus spécifiquement, les analyses effectuées par dimension (verticale ou horizontale) ont montré que les personnes âgées avaient une variance horizontale de la position des fixations moins importante que les jeunes conducteurs. Ces résultats sont similaires à ce que Crundall et al. [31, 34] ont observé en comparant des conducteurs expérimentés et experts à des conducteurs inexpérimentés. Dans ces études, les conducteurs expérimentés et experts (policiers) ont montré une variance verticale de la position des fixations moins importante que les conducteurs inexpérimentés. Nous ne pouvons pas exclure que la tendance observée dans notre étude soit attribuable à l'expérience plus importante des conducteurs âgés plutôt qu'au vieillissement. La variance horizontale a été plus importante pour les jeunes

conducteurs dans tous les contextes de conduite. L'analyse qualitative a confirmé la tendance de « vision tunnelaire » lors des dépassements alors que les personnes âgées ont fixé pour une proportion plus importante de temps le véhicule devant eux avant d'effectuer le dépassement. Le nombre de dépassements étant peu important dans notre étude, il faut éviter de conclure hâtivement, mais il est envisageable que ces résultats reflètent une appréhension des personnes âgées à dépasser le véhicule qui les précède. Lobjois et Cavallo [35, 36] ont montré que les personnes âgées étaient moins efficaces que les jeunes adultes à percevoir un espace acceptable pour traverser la rue en tant que piéton. Il est possible que cette difficulté se reflète et même s'accroisse lors d'un dépassement où l'estimation du temps disponible est critique pour la réussite de la manœuvre. Tous les dépassements étaient imposés aux conducteurs dans notre étude et il était impossible de s'y soustraire.

Aucun effet contexte de conduite n'a été observé au niveau de la variance des fixations oculaires. Ce résultat diffère de ceux de Harbluk et al. [37] qui ont observé une diminution du balayage horizontal de la scène visuelle dans les contextes de conduite où la charge cognitive était plus importante. Ainsi, nous aurions dû observer une diminution de la variance horizontale dans les contextes de conduite complexes comme les intersections. L'une des explications possibles à cette divergence de résultats est que l'augmentation de la charge cognitive associée aux contextes de conduite présentés n'était pas suffisamment importante pour diminuer l'amplitude du balayage horizontal qui était déjà limitée par l'amplitude du champ visuel du simulateur (40 °).

Dans l'ensemble, les résultats observés pour les personnes âgées concordent avec la littérature sur le vieillissement qui montre que les personnes âgées ont des comportements oculaires et des stratégies de recherche d'informations différentes de ceux des jeunes conducteurs [18-20, 23, 32, 33]. Toutefois, plusieurs des variables analysées ont montré des différences importantes entre les deux groupes mais celles-ci ne se sont pas avérées statistiquement significatives. Plusieurs raisons peuvent expliquer le manque de significativité statistique malgré les fortes tendances observées. Premièrement, le nombre de sujets était peu élevé et les données ont montré une variabilité importante. Deuxièmement, les personnes âgées évaluées étaient relativement jeunes et en bonne santé. Des sujets plus vieux et en moins bonne santé cognitive ou physique n'auraient pas

nécessairement montré les mêmes comportements. Troisièmement, les situations de conduite présentées étaient relativement simples et ne permettaient pas d'observer les stratégies visuelles mises en place lors de situations très complexes comme les virages à gauche ou lors de situations d'urgence. Une deuxième explication possible est que les conducteurs âgés ont compensé efficacement un déficit du système sensorimoteur ou du traitement de l'information par leur habileté à analyser les situations de conduite, à identifier les risques, à anticiper les mouvements des autres conducteurs et à prévoir les situations conflictuelles. Ainsi, les personnes âgées arriveraient à conduire d'une manière sécuritaire lors de situations de conduite où la charge cognitive est basse, mais également lors de situations complexes comme la négociation d'une intersection en raison d'une meilleure représentation cognitive de l'environnement et des situations de conduite élaborée à partir des expériences vécues. Toutefois, des interrogations demeurent quant à la représentation cognitive de l'environnement de conduite.

En conclusion, nos résultats ne supportent pas totalement les conclusions d'Underwood et al. [16] qui avaient trouvé bien peu d'évidences appuyant le déclin des capacités de recherche d'informations visuelles chez les conducteurs âgés en bonne santé. Toutefois, la majorité des différences importantes ont été observées lors de dépassements imposés aux conducteurs. Très peu de différences ont été observées dans les autres contextes de conduite. Il serait pertinent d'évaluer les comportements oculaires et les stratégies de recherche d'informations des personnes âgées dans des contextes de conduite très complexes comme les virages à gauche.

Références

1. Hakamies-Blomqvist, L., T. Raitanen, and D. O'Neil, Driver ageing does not cause higher accident rates per km. *Trans Res F*, 2002. 5: p. 271-274.
2. Langford, J., R. Methorst, and L. Hakamies-Blomqvist, Older drivers do not have a high crash risk--a replication of low mileage bias. *Accid Anal Prev*, 2006. 38(3): p. 574-8.
3. Langford, J., et al., In defence of the 'low-mileage bias'. *Accid Anal Prev*, 2008. 40(6): p. 1996-9.
4. Hakamies-Blomqvist, L.E., Fatal accidents of older drivers. *Accid Anal Prev*, 1993. 25(1): p. 19-27.
5. Hauer, E., *The Safety of Older Persons at Intersections. Transportation in an Aging Society*. 1988, Transportation Research Board: Washington, DC.
6. McCoy, P., R. Ashman, and B. Foster, *Strategies for improving the safety of elderly drivers*, U.S.D.o. Transportation, Editor. 1991.
7. Hancock, P.A., et al., The effects of in-vehicle distraction on driver response during a crucial driving maneuvers. *Trans Hum Factors*, 1999. 1(4): p. 295-309.
8. Cantin, V., M. Lavallière, et al. (2009). "Mental workload when driving in a simulator: effects of age and driving complexity." *Accid Anal Prev* 41(4): 763-77.
9. Keeffe, J.E., et al., Vision impairment and older drivers: who's driving? *Br J Ophthalmol*, 2002. 86(10): p. 1118-21.
10. Owsley, C. and G. McGwin, Jr., Vision impairment and driving. *Surv Ophthalmol*, 1999. 43(6): p. 535-50.
11. Kline, D.W., et al., Vision, aging, and driving: the problems of older drivers. *J Gerontol*, 1992. 47(1): p. P27-34.
12. Waller, J.A., Research and other issues concerning effects of medical conditions on elderly drivers. *Hum Factors*, 1992. 34(1): p. 3-15; discussion 17-24.
13. Ball, K. and C. Owsley, The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function. *J Am Optom Assoc*, 1993. 64(1): p. 71-9.
14. Johnson, M.A. and D. Choy, On the definition of age-related norms for visual function testing. *Appl Opt*, 1987. 26(8): p. 1449-1454.
15. Cooper, R.L., Blind registrations in Western Australia: a five-year study. *Aust N Z J Ophthalmol*, 1990. 18(4): p. 421-6.

16. Underwood, G., et al., Eye fixation scanpaths of younger and older drivers in a hazard perception task. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2005. 25(4): p. 346-56.
17. Ogden, G.D., J.M. Levine, and J.E. Eisner, Measurement of Workload by Secondary Tasks. *Hum Factors*, 1979. 21(5): p. 529-548.
18. Owsley, C., K. Burton-Danner, and G.R. Jackson, Aging and spatial localization during feature search. *Gerontology*, 2000. 46(6): p. 300-5.
19. Sekuler, R. and K. Ball, Visual localization: age and practice. *J Opt Soc Am A*, 1986. 3(6): p. 864-7.
20. Ball, K.K., et al., Age and visual search: expanding the useful field of view. *J Opt Soc Am A*, 1988. 5(12): p. 2210-9.
21. Owsley, C., et al., Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychol Aging*, 1991. 6(3): p. 403-15.
22. Scialfa, C.T., D.M. Thomas, and K.M. Joffe, Age differences in the useful field of view: an eye movement analysis. *Optom Vis Sci*, 1994. 71(12): p. 736-42.
23. Maltz, M. and D. Shinar, Eye movements of younger and older drivers. *Hum Factors*, 1999. 41(1): p. 15-25.
24. McPhee, L.C., et al., Age differences in visual search for traffic signs during a simulated conversation. *Hum Factors*, 2004. 46(4): p. 674-85.
25. Pradhan, A.K., et al., Using eye movements to evaluate effects of driver age on risk perception in a driving simulator. *Hum Factors*, 2005. 47(4): p. 840-52.
26. Chapman, P.R. and G. Underwood, Visual search of driving situations: danger and experience. *Perception*, 1998. 27(8): p. 951-64.
27. Folstein, M.F., S.E. Folstein, and P.R. McHugh, "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *J Psychiatr Res*, 1975. 12(3): p. 189-98.
28. Falkmer, T. and N.P. Gregersen, A comparison of eye movement behavior of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments. *Optom Vis Sci*, 2005. 82(8): p. 732-9.
29. Liu, A., What the driver's eye tells the car's brain, in *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*, G. Underwood, Editor. 1998, Oxford: Elsevier.
30. Underwood, G., et al., Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, 2003. 46(6): p. 629-46.
31. Crundall, D. and G. Underwood, Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 1998. 41(4): p. 448-458.

32. Kosnik, W., et al., Visual changes in daily life throughout adulthood. *J Gerontol*, 1988. 43(3): p. P63-70.
33. Mourant, R.R. and T.H. Rockwell, Strategies of visual search by novice and experimental drivers. *Hum Factors*, 1972. 14(4): p. 325-35.
34. Crundall, D., et al., Eye movements and hazard perception in police pursuit and emergency response driving. *J Exp Psychol Appl*, 2003. 9(3): p. 163-74.
35. Lobjois, R. and V. Cavallo, Age-related differences in street-crossing decisions: the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accid Anal Prev*, 2007. 39(5): p. 934-43.
36. Lobjois, R. and V. Cavallo, The effects of aging on street-crossing behavior: from estimation to actual crossing. *Accid Anal Prev*, 2009. 41(2): p. 259-67.
37. Harbluk, J.L., Y.I. Noy, and M. Eizenman, The impact of cognitive distraction on driver visual behaviour and vehicle control. 2002, Transport Canada: Ottawa.

Chapitre 5 Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity

Cantin Vincent^{1,2}, Lavallière Martin^{2,3}, Simoneau Martin^{2,3}, Teasdale Normand^{2,3}

¹Université du Québec à Trois-Rivières, Département des sciences de l'activité physique, Trois-Rivières, Canada

²Université Laval, Faculté de médecine, GRAME, PEPS, Québec, Canada

³Unité de recherche sur le vieillissement, Centre de recherche FRSQ du CHA universitaire de Québec, Québec, Canada

Keywords : driving; aging; simulator; mental workload; intersections; overtaking maneuvers.

Article accepté pour publication dans : Accident Analysis & Prevention 2009

Résumé

Des erreurs de conduite peuvent survenir en raison d'une augmentation momentanée de la charge cognitive provoquée par des situations complexes de conduite automobile comme les intersections. Cette étude évalue si la charge cognitive de conducteurs actifs (jeunes adultes et personnes âgées) varie en fonction de la difficulté du contexte de conduite. La technique du temps de réaction (TR) inattendu a été utilisée pour mesurer la charge cognitive survenant lors de la conduite d'un simulateur. La tâche secondaire consiste à répondre vocalement (« top ») aussi rapidement que possible à un stimulus sonore ce qui permet d'éviter les interférences structurales. Les participants devaient parcourir un scénario continu de 26.4 km composé de sections de conduite urbaines et rurales. Spécifiquement, les stimuli survenaient aléatoirement lors des trois contextes suivants : a) conduite en ligne droite à vitesse constante, b) approche d'une intersection où le conducteur devait s'immobiliser, c) dépassement d'un véhicule lent. À moins d'une erreur de la part du conducteur, le scénario n'incluait aucune manœuvre d'urgence. Le temps de réaction est défini comme l'intervalle de temps entre la présentation du stimulus et la réponse vocale détectée à partir du signal analogique d'un microphone piézo-électrique fixé sur un casque d'écoute (précision : ms). Le TR de base mesuré alors que le simulateur était arrêté s'est avéré similaire pour les deux groupes de sujet. La conduite a fait augmenter le TR des deux groupes de sujet et les TR ont augmenté en fonction de l'augmentation de la complexité des conditions de conduite (ligne droite, intersection et dépassement). Cependant, les conducteurs âgés ont montré des TR plus longs que ceux des jeunes adultes pour tous les contextes de conduite et les différences observées ont été exacerbées pour le contexte dépassement. En conclusion, la conduite augmente la charge cognitive pour tous les conducteurs mais l'augmentation observée est plus importante pour les personnes âgées et même exacerbée pour la condition dépassement.

Abstract

Driving errors for older drivers may result from a higher momentary mental workload resulting from complex driving situations, such as intersections. The present study examined if the mental workload of young and older active drivers vary with the difficulty of the driving context. We adopted the probe reaction time (RT) technique to measure the workload while driving in a simulator. The technique provided clear instructions about the primary (driving) and secondary (RT) tasks. To avoid structural interference, the secondary task consisted of responding as rapidly as possible with a vocal response (« top ») to an auditory stimulus. Participants drove through a continuous 26.4-km scenario including rural and urban sections and probes (stimuli) were given in a baseline static condition and in three different driving contexts embedded into the overall driving scenario. Specifically, stimuli were given randomly when: a) driving on straight roads at a constant speed, b) approaching intersections for which the driver had to stop the car, and c) when overtaking a slower vehicle. Unless a driving error was made, drivers did not need any emergency responses. Reaction time was defined as the temporal interval between the auditory stimulus and the onset of the corresponding verbal response detected from the analog signal of a piezo-electric microphone fixed on a headset (ms accuracy). Baseline RTs were similar for both groups. Both groups showed longer RTs when driving and RTs increased as the complexity of the driving contexts increased (driving straights, intersections, overtaking maneuvers). Compared to younger drivers, however, older drivers showed longer RTs for all driving contexts and the most complex driving context (overtaking maneuvers) yielded a disproportionate increase. In conclusion, driving lead to a greater mental workload for the older drivers than for the younger drivers and this effect was exacerbated by the more complex driving context (overtaking maneuvers).

1. Introduction

The act of driving offers mobility and independence. These characteristics are not only practical, but also symbolic, particularly for older drivers. Currently, in most western countries older drivers represent about 12 to 15% of the driving population and they are the fastest growing segment of the driving population. For instance, in Canada, drivers older than 65 years represent 13.2% of the total population of licensed drivers and it is expected that within the next 15-20 years, they will represent about 25% of the driving population (Robertson and Vanlaar, 2008). Driving is a perceptual-motor skill, these can be closed or open skills. As opposed to being a closed skill for which the environment is predictable and relatively stable, driving is an open skill with a dynamic environment. Success in open skills is often determined by the extent to which an individual is successful at adapting behaviors to the changing environment and the complexity corresponding to the context (Schmidt and Lee, 2005). There are several reports suggesting that older drivers may have difficulty in adjusting their driving behaviors to complex traffic situations which require adaptations. For instance, in a recent review of collision situations involving older drivers, Mayhew et al. (2006) reported that compared with younger drivers, older drivers are overrepresented in overtaking another vehicle and merging crashes, angle crashes and intersection crashes. Similar data have been presented elsewhere (Langford and Koppel, 2006; McGwin and Brown, 1999; Oxley et al., 2006). The reasons for these over representations are not clearly understood.

Several retrospective analyses of crashes suggest that, compared to younger drivers, older drivers violate more traffic controls (Preusser et al., 1998), fail to yield the right of way and to heed stop signs or signals (McGwin and Brown, 1999). Braitman et al. (2007) recently conducted phone interviews of 227 older drivers involved in non-fatal intersection crashes. The authors mentioned that drivers age 70-79 reported more misjudgments about whether there was enough time to proceed whereas for older drivers (80+) search errors (e.g., looking but not seeing) were more predominant as the potential cause of the accident. These studies, although they provide valuable information about crashes, are not without limitations since they often rely on a subject's recollection of events and this may not correlate with actual information processing activities preceding the events (and the driving error).

As errors are often the consequence of high mental workload, there is a large body of literature on the topic of mental workload. When driving, measuring the mental workload can provide an indication of the cognitive demands placed on the driver (de Waard, 1996; de Waard and Brookhuis, 1997). There are several techniques available to measure their mental workload. This includes subjective opinions, physiological measures and task performance. It is beyond the scope of this paper to review all issues related to mental workload measurements (for a review, see Tsang and Wilson, 1997). The measurement technique adopted for the present study uses a secondary subsidiary task; drivers are instructed to maintain driving performance (primary task) and to respond as rapidly as possible to an auditory stimulus (secondary task). This method seeks to saturate a presumed limited mental workload capacity, that is a single-channel operation for performing mental tasks and thus attempts to estimate the proportion of this channel that is necessary for successful completion of the primary task (Kahneman, 1973; O'Donnell and Cohen, 1993). To measure the workload imposed by the primary task, we compared the levels of performance obtained when the secondary (or loading) task is performed alone (RT task in the present study) with the performance obtained on the same task when it is performed simultaneously with the primary task (driving in the present study). The purpose of the secondary task is not to perturb the primary task (driving) but to quantify the workload imposed by various levels of driving complexity through changes in performance of the secondary task. For instance, Hancock et al. (1990) used this technique to examine the mental workload for left and right turn maneuvers compared to driving straights (on-road measurements) by asking subjects to respond to a probe light mounted on the dashboard directly in front of them. Drivers were asked to press a button as rapidly as possible after detection without modifying their driving performance. Response times were longer during turn maneuvers than when driving straights; this suggests that a higher driver workload characterizes turn sequences compared to driving straights. Although these results are valuable, there is a possibility that the motor action (i.e., pressing a button) was delayed because it interfered with steering control when turning. More recently, several authors have adopted a variation of this technique, the Peripheral Detection Task or PDT (Jahn et al., 2005; Patten et al., 2006; Verwey, 2000) to quantify mental workload for various driving contexts. Generally, results show that PDT response times and errors increase with

the complexity of the driving contexts. As an example, Janh et al. (2005) reported that driving within a city center (with complex intersections and road signs where the driver has to yield the right of way) resulted in longer PDT response times than driving in urban and rural areas characterized by reduced interactions with other vehicles. Patten et al. (2006) reported similar observations. In addition, these authors showed that, compared to a group of more experienced and active drivers, less active and experienced drivers were slower to respond to the PDT. These results are important because they highlight that driving is not an automated task and that the workload generally increases with an increased complexity of the driving context and with a lack of expertise. There are few data available on mental workload when driving in a simulator particularly so for older drivers. One example of such work is that of Verwey (2000). In this experiment, young and older drivers performed a visual detection task or a simple addition task (with the information presented auditory) when driving on-road. Older drivers were less accurate than younger drivers with the addition task when driving in roundabouts and highways. It is worth noting that no age effects were documented for the visual detection task. However, for the other driving contexts (e.g., straight roads, turning right or left at uncontrolled intersections), older drivers showed a reduced performance but the difference was not statistically significant. A better understanding of the workload imposed by various driving conditions would therefore help to understand the etiology of driving errors in older drivers (and young or novice drivers). There is a possibility that, for older drivers, an increased mental workload during more complex maneuvers could reduce their ability to switch their attention between critical tasks (e.g., watching coming traffic, pedestrians, reading traffic signs, dashboard displays) (Rizzo et al., 2004). To verify how mental workload varies within a simulator environment, we designed an experiment where driving was the primary task and responding to an auditory stimulus with a verbal response was the secondary task. The following hypotheses were tested: 1) as for on-road driving, more complex driving maneuvers impose a greater mental workload on the driver, 2) all driving contexts impose a greater mental workload on older than on younger drivers, and 3) compared to younger drivers, more complex driving contexts impose a greater mental workload on older drivers.

2. Method

2.1 Participants

Ten young (mean age = 24 years, range = 20-31) and ten older drivers (mean age = 69 years, range = 65-75) participated in the study. Older drivers were recruited by advertisements in local newspapers and through aging coalitions. Younger drivers were recruited from the academic community of Laval University. All subjects were males to avoid gender effects. Upon their arrival in the laboratory, each participant was briefed on the requirements of the experiment and all read and signed an informed consent declaration that conformed to Laval University Institutional Review Board policy. Subjects completed clinical tests (MMSE (Folstein et al., 1975), Snellen visual acuity, Melbourne Edge test (Verbaken, 1989)) and a general verbal questionnaire which included items on driving history (years of driving experience, frequency of driving and average km/week and year) and general health (neurological and musculoskeletal problems, use of medication, drinking habits). There is a currently a debate regarding the validity of self reports to estimate driving exposure (Langford et al., 2006; Staplin et al., 2008). The questionnaire information only served to verify that participants were « active » drivers and not to establish a « low mileage bias ». All subjects scored 27 or higher on the MMSE and had normal or corrected to normal vision. Table 1 presents a summary of these observations.

Table 1: Descriptive results for the young and elderly drivers (N= 10 for each group)

| | Young drivers | Elderly drivers | P values |
|------------------------------|---------------|-----------------|----------|
| Age | 24.0 (3.5) | 69.4 (3.0) | < 0.001 |
| Years of driving experience | 7.0 (2.4) | 47.5 (5.3) | < 0.001 |
| Alcohol consumption per week | 3.4 (3.9) | 3.1 (3.8) | > 0.05 |
| MMSE | 28.0 (1.2) | 27.2 (0.4) | > 0.05 |
| Snellen high contrast | 0.9 (0.3) | 1.0 (0.2) | > 0.05 |
| Snellen low contrast | 1.2 (0.4) | 1.6 (0.6) | > 0.05 |
| Melbourne edge test | 21.7 (1.5) | 19.3 (1.3) | < 0.01 |

2.2 Apparatus

Participants were tested in a fully interactive driving simulator (Allen, 1990). The simulator consists of an instrumented mid-sized sedan (brake and accelerator pedals, steering and all manual controls) with automatic transmission interfaced with a programmable software (STISIM Drive 2.0 by Systems Technology Inc.) allowing to develop driving scenarios and to record the driver's performance. A projector (Hitachi CP-X275) displays the visual information on a flat wall (1.45 m high x 2.0 m wide) located 2.2 m from the steering. The center of the screen is located at eye level through the midline of the subject and it allows 40° horizontal by 30° vertical field-of-view. Blue curtains on each side of the screen shielded the visual peripheral information. The simulator also includes a digital input/output board (Computer Measurement PCI-DIO24) that presents auditory stimulus through a piezoelectric speaker (100 ms, 1.5 KHz) and that simultaneously activate an electronic millisecond timer (Lafayette 54417-A). An electronic microphone (Lafayette 18010), fixed on a headset, is activated by a verbal loud response ("top") to stop the millisecond timer. Steering movements and displacements of the accelerator and brake pedals also are recorded (Computer Measurement PCI DAS08, 12-bit A/D) during the drives.

2.3 Procedures

After completion of the clinical tests and the questionnaire, participants were introduced to the simulator with specific instructions explaining the primary (driving) and secondary (probe reaction time) tasks. They were instructed to drive similarly as they would for on-road conditions. Their priority was to maintain safe control of the vehicle at any moment of the simulation and then to respond to the auditory stimuli as fast as possible. Next, a control condition for the secondary reaction time (RT) task, then a practice run and finally the experimental run followed. The control condition consisted of responding vocally ("top") as rapidly as possible to ten auditory stimuli while the driver was simply sitting in the simulator. For this condition, a static image was presented on the screen without driving.

The intervals between stimuli were irregular and varied between 15 to 90 seconds. The mean RT for those 10 trials was calculated and used as the baseline RT.

Then, the participants drove the 12-km practice run with less graphical information than the experimental scenario. This practice served the purpose of familiarizing subjects with the simulator and the general feel of the pedals and steering. Auditory stimuli were also presented during the practice run to make sure subjects were familiar with both the primary driving task and the secondary RT task. Before starting the practice run, subjects were informed that the simulator could make them feel uncomfortable (nausea). They were specifically instructed to inform the experimenter if this happened and were told the experiment would stop immediately with no consequences. To reduce these sensations, the temperature within the room was maintained at about 17 C. The simulator is an open cab and ventilation is provided with a ceiling vent positioned just above the driver. A 5-min rest between the practice and the experimental run was provided. With these measures, we have, on average, less than 5% of our subjects reporting sensations preventing them from pursuing the experiment. In the present study, all but one subject (elderly individual) reported being comfortable after the practice run. Data for this subject are not reported herein.

2.3.1. Driving scenario

The experimental run consisted of a continuous scenario of 26.4 km of urban and rural roads with almost no slopes and minor grade changes. To comply with the 40 degree field of view limitation of our simulator, there was no right or left-turn maneuver at intersections. Also, moderate curves only were presented (smallest radius of 120 m). These procedures also contribute to minimize simulator symptoms. The scenario included a normal driving environment (two-way and four-way roads in urban and rural areas, intersections with stop sign or crossing light). Lane width and markings were according to governmental rules and speed limit and advisory signs appeared throughout the scenario. Subjects were asked to follow speed limits and to comply with local traffic laws throughout the course of the experiment. The scenario did not require any emergency braking response unless the driver made an error.

2.3.2 Mental workload measurement

In the present study, probes (stimuli) were given in three different driving contexts embedded into the overall 26.4-km scenario. Reaction time was defined as the temporal interval between the presentation of an auditory stimulus and the onset of the corresponding verbal response detected from the analog signal of the piezo-electric microphone fixed on the headset. It is important to note that temporal measurements were independent of the load on the graphics processor since an external clock (ms accuracy) served to measure all RTs. In comparison to the baseline RT, any increase in RT when driving would reflect an increase in the workload necessary to drive. For the complete scenario of 26.4 km, 36 auditory stimuli were given during three general driving contexts of increasing complexity: a) driving on straight roads at a rather constant speed (n=16), b) approaching intersections for which the driver had to stop the car (n=15), and c) when overtaking a slower vehicle (n=5). For on-road conditions, mental workload for driving on straight roads without much interaction with other traffic is low because it imposes low demands on information processing as well as on vehicle handling (Jahn et al., 2005). As mentioned above, to comply with simulator limits all intersections had no right or left turns. However, careful observation of traffic conditions for decelerating and driving through the intersection was necessary. These processes typically increase the demands on information processing and vehicle handling. The auditory stimuli were activated when the car was between 100 m to 60 m from the intersection. A previous study with young drivers showed an increased mental workload compared to driving straights and the workload did not vary when stimuli were presented at 60 m or 100 m from the intersection (Teasdale et al., 2004). Moreover, when driving on four-lane roads, the drivers were instructed to drive in the rightmost lane except when a recorded message indicated in advance to the driver that he would encounter a slower vehicle and that he should safely overtake the vehicle. This driving context places more demands on both information processing and on vehicle handling since subjects need to adjust their speed with that of the slower vehicle and perform a driving maneuver requiring accurate control of the vehicle to switch lane. Stimuli were given just before or during the overtaking maneuver which took place 5 to 8 seconds after the recorded message. Driving conditions without auditory stimulus were included to prevent subjects from associating a particular context (for instance, overtaking a slower vehicle) with the

systematic presence of an upcoming stimulus. Also, the number of stimuli was not counterbalanced across driving contexts. This is a necessary compromise to attain some ecological validity for the overall driving scenario where subjects are not overwhelmed by a series of driving maneuvers they would not normally encounter during on-road driving.

2.4 Data analyses

2.4.1 Reaction Time

A common statistical procedure for analyzing RT data consists of eliminating outliers (Ratcliff, 1993). Generally RT faster than a fix value (usually 150 ms) and slower than a value corresponding to the mean plus two standard deviations are removed. RTs faster than 150 ms are considered anticipation and do not reflect information processing. On the other hand, slower RTs are considered outliers and it is sometimes suggested they inflate unduly mean RT values which is an estimate of the duration of cognitive processes. A first analysis of probe RTs was thus conducted by removing, for each subject, trials for which RTs were faster than 150 ms or slower than each subject's mean RT plus two standard deviations. Overall, 26 responses were removed (2.8% of all stimuli) and none were faster than 150 ms. We also noted 21 stimuli that subjects omitted to respond (2.3% of all stimuli). Of these omitted responses, 15 were observed for older drivers (8 intersections, 5 overtaking maneuvers and 2 when driving straights). For younger drivers, omitted responses were observed for 5 intersections and 1 overtaking maneuver. Mean RTs without outliers were then submitted to a Group (Young, Elderly) x Driving Contexts (four levels; baseline, driving on straight roads, stopping at intersections, overtaking maneuvers) ANOVA with repeated measures on the last factor. We also conducted the same analysis without removing outliers. The ANOVAs for both analyses yielded similar results and we will only present results without the outliers.

2.4.2. Driving performance

The overall driving performance was described using dependent variables obtained directly from the simulator or calculated with Matlab (Mathworks Inc, v7.01). Continuous vehicle data (e.g., lateral position, distance covered, control of steering and pedals, etc.) were first

collected at a sampling rate varying with the speed of the graphics rendering (from 20 to 30 Hz). Before analyzing data, we interpolated the signals with a cubic spline function to obtain a constant 30 Hz frequency for all recorded time-series signals. Data were then filtered to remove high frequencies (Butterworth low-pass filter, second order with 7-Hz cut-off frequency) before calculating longitudinal speed. The overall time needed to complete the experimental run and the number of accidents were documented. Different measures were used to describe driving in the three contexts (straight roads, intersections and overtaking maneuvers). For this reason, driving performance data for each driving contexts were analyzed separately using one-way ANOVA group comparisons. For driving straights, we computed the mean, minimum and maximum speed (in km/h) for each segment recorded. Also, the standard deviation of the lateral position (SDLP, also called weaving) was measured for 200 m sections; this describes road tracking error (de Waard, 1996; Leufkens et al., 2007; O'Hanlon et al., 1982). For intersections, we measured the speed when the driver was at 100 m and 50 m from the intersection and the SDLP also was measured (for the last 100 m). Finally, for overtaking maneuvers, the mean, minimum and maximum speed and the number of road edge excursions were calculated for both groups. Specifically, we determined if the driver exceeded the centerline when moving from the right to the left lane to overtake the slower vehicle or the edge of the right lane when moving back to the right lane after overtaking the slower vehicle.

We conducted a secondary analysis of all fifteen intersections by rank ordering them (for each subject) on the basis of the measured RT. Hence, for each subject, each intersection was given a number on the basis of the RT (from 1 to 15, 1 being the fastest RT and 15 the slowest RT). Three intersections were among the faster RTs (presumably low mental workload) and three others were among the slowest RTs (presumably high mental workload) for nearly all subjects. Figure 1 illustrates these six intersections when the driver was approximately 75 m from the intersection. The left column presents the intersections with low mental workload whereas the right column presents the three with high mental workload. All three low mental workload intersections (left column) could be defined as rural without visual obstruction, with low traffic density and no pedestrians as the driver is approaching the road junctions. One intersection has a traffic light and two have stop signs. On the contrary, the three high mental workload intersections (right column) have

considerably more visual information. One intersection has a construction site, one has police vehicles and pedestrians on the right side of the road and the last one is an urban intersection with a gasoline station and two vehicles coming out of the station (one of them is a police vehicle). Complete video of the last 300 m for each of these six intersections are also available in supplementary material (video1.mp4 to video3.mp4, low mental workload; video4.mp4 to video6.mp4, high mental workload). Clearly, the intersections differ in the amount of visual information present and their subsequent processing demands. For these two subcategories (low mental workload and high mental workload intersections), the SDLP and the number of braking events exceeding 0.1 g were calculated. Braking events exceeding 0.1 g are measured from the vehicle's longitudinal deceleration. Mortimer et al. (1970) recorded braking events for 44 different drivers over nearly 15000 km driven. They reported that about 50 percent of the peak brake decelerations were below 0.10 g, 80 percent were below 0.20 g and 96 percent were below 0.3 g. More recently, Harbluck et al. (2007) defined hard braking events as braking exceeding .25 g and noted that the vast majority of these events took place at signalized intersections. In the present study, because no emergency braking responses were needed to drive safely, we calculated the number of braking events exceeding 0.1 g for each subject. This can provide an indication of the fluidity and smoothness of the braking. These data were then submitted to a Group x Mental workload content (Low, High) ANOVA with repeated measures on the factor Mental workload.



Figure 1. Illustrations of the Low (left column) and High mental workload intersections (right column). For all intersections, video of the 300 m approach are presented in the supplementary material.

3. Results

3.1. Mental workload

Figure 2 presents mean RTs for the baseline condition and the three driving contexts (driving on straight roads, stopping at intersections, overtaking maneuvers). The ANOVA yielded significant main effects of Group ($F(1,18) = 11.48, p < 0.01$) and Driving Contexts ($F(1,18) = 85.29, p < 0.001$) as well as a significant interaction of Group x Driving Contexts ($F(3,54) = 10.90, p < 0.01$). A decomposition of the interaction of Group x Driving Contexts showed that: 1) baseline RTs were similar for both groups ($p=0.299$), 2) both groups showed longer RTs as the complexity of the driving contexts increased ($P < 0.001$), and 3)

compared to younger drivers, older drivers exhibited a greater increase in RT for the overtaking maneuvers ($P < 0.001$). This latter result suggests the overtaking maneuvers led to a greater mental workload for older drivers than for younger drivers and that more complex driving contexts required more of the available cognitive resources for older than younger drivers. It is noteworthy to recall that omitted responses occurred predominantly during intersections and overtaking maneuvers (19 of the 21 omitted responses; 8 intersections and 5 overtaking maneuvers vs. 5 intersections and one overtaking maneuver for the older and younger drivers, respectively).

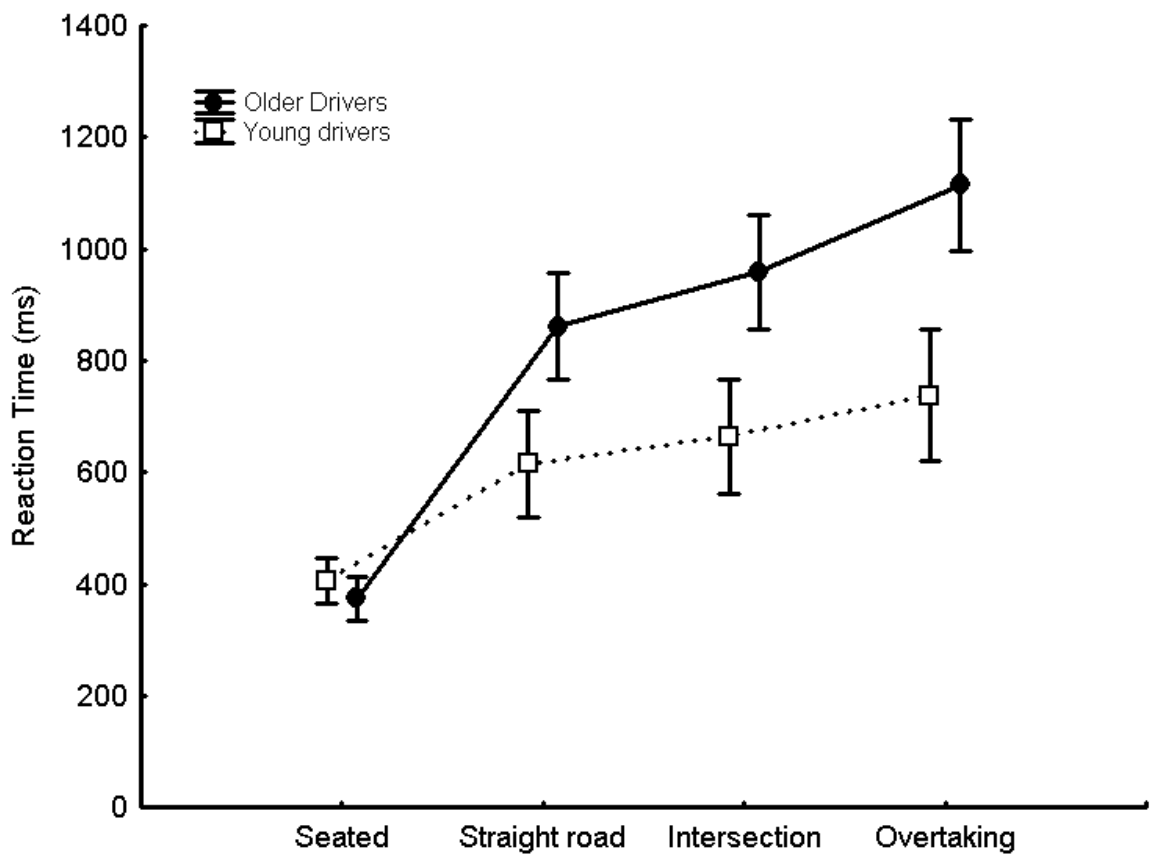


Figure 2. Mean reaction times for the older and younger drivers for the baseline condition (sitting in the simulator in a stationary position) and when driving on straight roads, approaching intersections or during overtaking maneuvers. Error bars represent confidence intervals (95% of the data distribution).

3.2. Driving performance

Overall, the elderly took more time to complete the experimental scenario than young drivers (on average, 34.2 min vs. 27.4 min.; $F(1,18) = 40.27$, $P < 0.001$). Overall, young drivers exceeded the speed limit 10 times (1.85% of the total distance with a speed exceeding the speed limit) whereas the older drivers exceeded it 3 times only (0.95% of the total distance). These differences were not statistically different.

We observed only 1 accident. This accident was for a elderly driver and a review of the accident showed this driver never looked (from oculometer data not presented in this manuscript) at the crossing light during the 100 m approach to the intersection. The driver went through the red light and this caused a side crash.

3.2.1. Driving on straight roads

When driving on straight roads, older drivers drove slower than younger drivers. Their mean (59.2 vs. 74.6 km/h), minimum (46.5 vs. 62.4 km/h) and maximum speed (67.6 vs. 82.7 km/h) were all lower than those observed for young drivers ($F(1,18) = 52.57$, 47.82, and 45.74, $P_s < 0.001$ for the mean, minimum and maximum speed, respectively). Standard deviation of lane position (SDLP) was similar for both groups (0.21 m for both groups, $F(1,18) = 0.27$, $P > 0.05$).

3.2.2. Intersections

As for driving on straight roads, older drivers arrived at intersections at slower speeds than young drivers. They were about 15 km/h slower than younger drivers both at 100 m (52.4 vs. 68.4 km/h; $F(1,18) = 52.13$, $P < 0.001$) and at 50 m (48.1 vs. 63.2 km/h; $F(1,18) = 55.69$, $P < 0.001$) from the intersection. The SDLP again was not different (0.20 m for both groups; $F(1,18) = 0.54$, $P > 0.05$).

3.2.3. Overtaking maneuvers

When overtaking slower vehicles, younger drivers also drove faster than elderly drivers. Their mean (51.3 vs 38.9 km/h), minimum (40.6 vs. 31.4 km/h) and maximum speed (70.2 vs. 54.7 km/h) were higher than those observed for older drivers. Differences, however,

were only statistically present for the mean and the maximum speed ($F(1,18) = 6.66$, and 45.74 , $p < 0.01$ for the mean and maximum speed, respectively; $F(1,18) = 1.61$, $P > 0.05$ for the minimum speed). Only two occurrences of driving off the road occurred (one for each group).

3.3. Secondary analysis of intersections

The mental workload imposed by the intersections (Low, High) affected the driving performance of both groups. Figure 3 shows the speed at 100 m and at 50 m from the intersection for High and Low mental workload intersections. Speed data were submitted to a Group x Distance x Mental workload ANOVA with repeated measures on the last two factors. Figure 3 illustrates that older drivers drove slower than younger drivers for both workload intersections and that both groups drove slower for the High than the Low mental workload intersections. The main effect of Group, Distance, and Mental workload content were all statistically significant ($F(1,18) = 43.75$, 88.73 , and 222.81 , $P < 0.001$, respectively). All interactions involving the factor Group were not significant. For both groups, the SDLP was greater when the intersections were characterized by a High rather than a Low mental workload (on average, 0.28 vs 0.24 m; $F(1,18) = 6.49$, $P < 0.05$ for the main effect of Mental workload). The main effect of Group and the interaction of Group x Workload were not significant ($P > 0.05$). Finally, Figure 4 shows for both groups the number of braking events (per intersection) that exceeded 0.1 g as a function of the mental workload. Both groups produced more of these braking events for the High than for the Low mental workload intersections ($F(1,18) = 50.18$, $P < 0.001$ for the main effect of Workload). Remarkably, older drivers showed more of these events than younger drivers (3.1 vs. 2.3 ; $F(1,18) = 8.13$, $P < 0.01$ for the main effect of Workload) regardless of the workload conditions ($F(1,18) = 0.01$, $P > 0.05$ no interaction of Group x Workload).

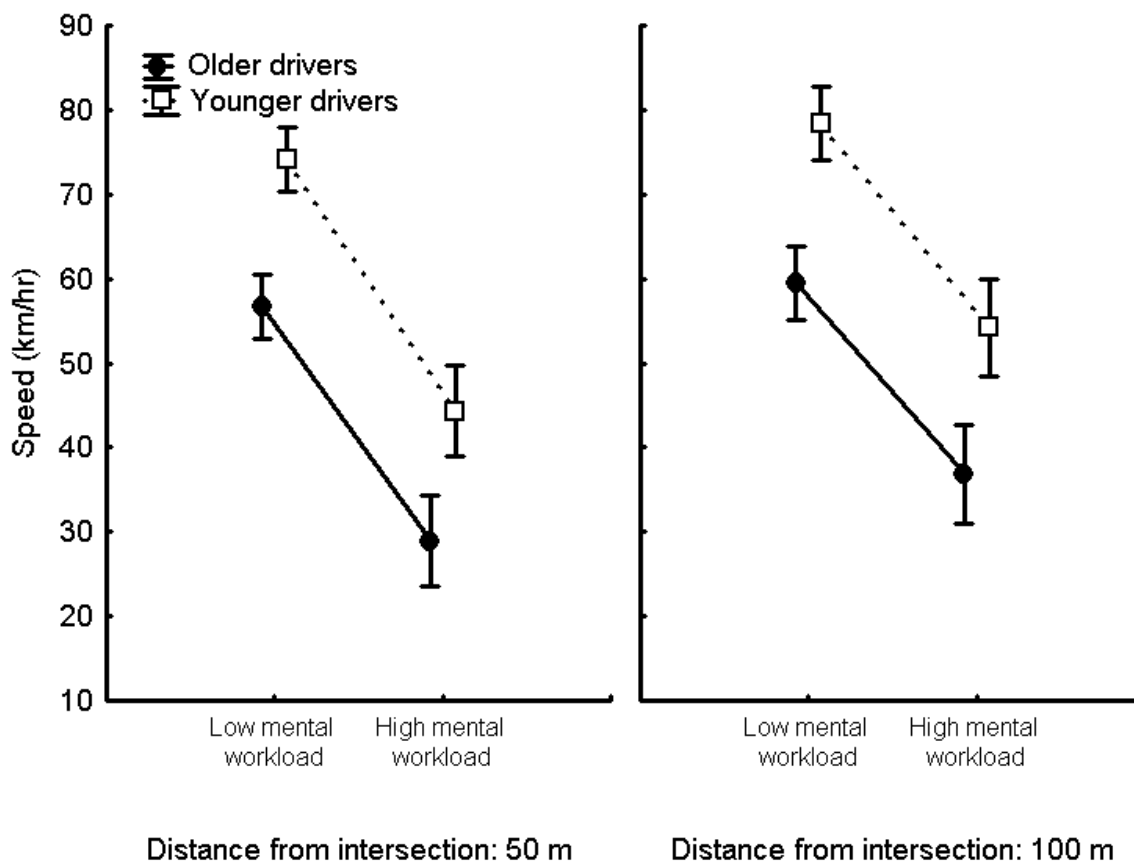


Figure 3. Mean speed of the older and younger drivers when they were 100 m and 50 m from Low or High mental workload intersections. Error bars represent confidence intervals (95% of the data distribution).

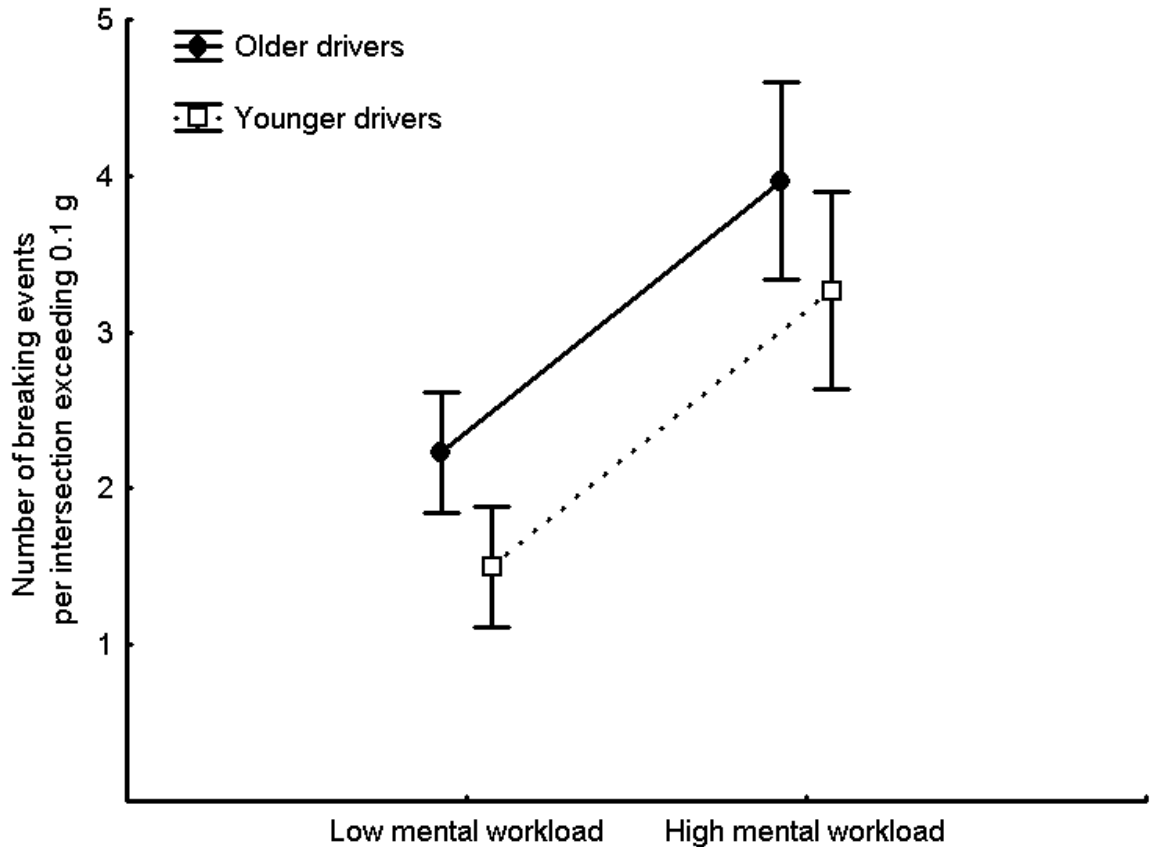


Figure 4. Mean number of braking events exceeding 0.1g when older and younger drivers stopped at Low and High mental workload intersections. Error bars represent confidence intervals (95% of the data distribution).

4. Discussion

The main findings of this study are that mental workload, when driving in a simulator, increases as the complexity of the driving context increased. Compared to young drivers, older drivers showed a disproportionate increase in the workload with an increasing complexity of the driving context. The increased mental workload and changes in the driving performance observed for older drivers tested in this study may represent an underestimate of what is actual in the driving population as a whole. Participants were volunteers recruited via general advertisement. These individuals are likely to express a bias in safe driving practices. As well, all drivers were active and cognitively fit (MMSE >27 for all participants). Driving conditions were nearly ideal, mostly with light traffic and

drivers were not distracted by any external events such as a conversation with a passenger or use of cell-phone or any in-vehicle devices. Also, none of the driving contexts required an emergency response unless a driving error was made (for example, failure to stop at an intersection or initiating an overtaking maneuver on a two-lane road while a car was present in the left lane). Nevertheless, the mental workload was higher for older than younger drivers and this was observed in all driving contexts. Intersections and overtaking maneuvers required more mental workload than driving straights. This finding agrees with the suggestion that, for older drivers, driving through an intersection is a difficult aspect of driving (Hakamies-Blomqvist et al., 1999). For older drivers, there are numerous databases showing that proportionally more accidents occur at intersections (Cooper, 1990; Hakamies-Blomqvist et al., 1999; Hauer, 1988; Mayhew et al., 2006; Owsley et al., 1998). To explain these high rates of accidents, Hakamies-Blomqvist et al. (1999) suggested that intersections could produce very high momentary mental workload. In our study, we showed that the mental workload increased at intersections and that it was higher for the more complex intersections. This was observed in both groups. Because of limitations with our fixed base simulator, none of our intersections required an actual left or right-turn maneuver and there is a possibility that these maneuvers could lead to an even greater mental workload for the older drivers. This is suggested by the disproportionate increase in the mental workload for the older drivers when they faced the more complex overtaking maneuvers which required a careful evaluation of the traffic and speed of surrounding vehicles prior to initiating the lane change.

It is worth mentioning that introducing the secondary task did not perturb the driving performance. We did not observe any decreased performance in the control of the vehicle (e.g., no increased in edge excursions or increased weaving) when stimuli were presented. The secondary task was an auditory task with a verbal response and this certainly limited the possibility of any structural interference. Although all driving conditions caused a greater mental workload in the older than the younger drivers, we do not know if cognitive resources were saturated. There are some indicators that for older drivers this could have been the case for some transient periods. For instance, although the number of omissions (no response to the auditory stimulus) was small for both groups, it is noteworthy that for the more complex driving contexts (intersections and overtaking maneuvers) older drivers

did not respond to a stimulus more than twice as often as younger drivers (13 vs 6 stimuli, respectively). This may be an indication of what Hancock and Warm (1989) have labeled a transient state where demands on the system lead to an onset of a failure state in which performance level can decrease rapidly. Also, compensatory driving strategies (slower speed) were observed for older drivers. These adaptations presumably served to reduce the mental workload imposed by the driving context. Similar behaviors have been observed in several studies on cell phone use (Patten et al., 2004) or use of in-vehicle devices (Horberry et al., 2006). Given that the frequency of accidents or incidents did not increase for elderly drivers, the compensatory mechanisms seem to have been adequate. We observed only one serious error; this error was by an older driver and it occurred at an intersection. It would be interesting to evaluate if this failure state could be observed for at-risk drivers such as drivers older than 85 years old or those suffering from mild cognitive impairments. These at-risk drivers may exhibit specific driving errors and lack of adaptation to the more complex driving contexts (for example, when comparing speed and braking events exceeding 0.1 g for the Low and High mental workload intersections).

A recent publication by Makishita and Matsunaga (2008) showed that elderly drivers mental workload (measured with a secondary auditory reaction time task) was saturated when driving on a closed circuit. In this study, two secondary tasks were added to the driving task, a mental calculation task and an auditory reaction time task. Compared to baseline values (RT in a stationary condition), RT showed large increases for older drivers compared to middle-aged or young drivers. The mental workload measured when driving on public roads, however, was not greater for older drivers. This lack of effect could result from several causes. First, for safety reasons the mental calculation task was not performed when driving on public roads and workload was measured with the secondary RT task only. Also, auditory stimuli were given randomly when driving. This procedure may have 'washed out' effects that could have been observed by comparing RTs for maneuvers or various complexities as we observed in our study. On the other hand, the authors report important individual differences and mention that several drivers were strongly affected by the secondary RT task. Their figure 8 clearly identifies a number of older drivers which exhibited higher mental workload than young or middle-aged drivers. Our results clearly illustrate that the mental workload is not a fixed value for an individual. This also was

nicely illustrated by Verwey (2000) when comparing experienced and novice drivers on-road. In this study, the ability to perform successfully a secondary task was highly dependent on the driving maneuver underway.

The notion of mental workload (and attention) is sometimes controversial. Much of the controversy centers on the notion of a single unified resource and about the functions of attention. As proposed by Neumann (1996) this should not prevent us from using the term as long as we are aware that it describes a variety of mechanisms. The challenge relies in identifying these mechanisms that pertain to the task being studied and to understand how they evolve with task conditions (e.g., driving complexity). For driving, and as Makishita and Matsunaga rightly pointed out (2008), it may be important to simply identify those individuals showing increased mental workload and saturation (even within the younger driver population) when performing other tasks such as simply conversing with a passenger, using the cell phone or in-vehicle devices. Safety errors should increase in situations where information processing demands are high and both rapid reactions and proper allocation of the cognitive resources are necessary to respond safely to the other vehicles and events that could occur (Brouwer and Ponds, 1994; Hakamies-Blomqvist, 1994; Rizzo et al., 2001). A better control of contexts with progressively increased difficulty may contribute to the development of more specific driving scenarios for training purposes. Such a suggestion raises important questions regarding the ability (and trainability) of an individual to allocate resources specifically or to prioritize some of the processes involved when driving as a function of the specific driving context (for instance, to switch to or to prioritize particular aspects of the driving performance). Rizzo et al. (2001) suggested that this might be a problem for cognitively impaired individuals but that presenting driving conditions of increased complexity in a simulator environment permits to study and challenge these individuals in a safe environment for both the driver and the tester.

It is important to mention that although older drivers exhibited a higher mental workload than younger drivers for all driving scenarios, their driving performance was not that different than that of younger drivers. As often reported both for on-road and simulator driving (Hakamies-Blomqvist et al., 1999; Planek and Fowler, 1971; Szlyk et al., 1995)

older drivers drove slower than younger drivers but they responded to the increased complexity of the driving scenario with the same compensatory strategy than younger drivers; they reduced their speed and did not show greater standard deviation of lane position nor more lane edge excursions. The slower speed adopted by the older drivers is often considered as a compensatory and conservative driving strategy. The older drivers may adopt this compensatory strategy because of difficulties in judging speed and distances. Indeed, there have been several suggestions that older drivers have a decreased ability to detect an impending collision (Andersen et al., 2000; Schiff et al., 1992). Also, older drivers self-reported analysis of crashes at intersections are often related to a misjudgment of the speed and distances of other vehicles. This effect was certainly downplayed in the present study as there were no right or left turns. For this reason, we also looked at braking events when decelerating at intersections. For on-road studies, it has been reported that an increased number of braking events exceeding .25 g is associated with an increased mental workload (Hancock et al., 2003; Harbluk et al., 2007). In the present study, we use a lower g value (0.1 g) to examine the smoothness of the braking process. Older drivers produced more braking events exceeding 0.1 g than younger drivers when they decelerated at these intersections. Remarkably, they responded to the increase in complexity of the intersections in a similar manner than younger drivers; they drove slower and increased their number of braking events exceeding 0.1 g. This strategy may arise from the higher mental workload or from a motor rather than a visual perceptual deficit. Although static visual acuity is certainly different than dynamic visual acuity, both groups had similar Snellen scores. As well, common manifestations of aging are sensory degeneration of the lower limbs (Skinner, 1984) and an increased movement variability (Darling et al., 1989). There is a possibility that a decreased sensory detection capability increases the need to sometimes apply greater forces on the brake pedal. This could serve to stimulate sensory receptors in order to reach higher thresholds for detecting and calibrating ankle and foot movements required for braking (Cantin et al., 2004). An alternative hypothesis is that these braking events are simply the expression of an increased motor output variability (Schmidt et al., 1979) associated with aging (Darling et al., 1989). Unfortunately, our data do not allow to discriminate between these possibilities.

5. Conclusion

This study shows that, despite compensatory driving strategies (slower speed), driving lead to greater mental workload for the older than the younger drivers and this effect was exacerbated in the more complex driving context (overtaking maneuvers). With the advent of more powerful graphics processors and renderers, simulators are increasingly appealing for studying and training drivers. There are, however, several validity questions regarding the use of simulators that remain (Pinto et al., 2008). The present study shows that mental workload in a simulator parallels observations made on-road (for instance, Hancock et al., 1990; Jahn et al., 2005; Patten et al., 2006; Verwey, 2000). These results are important because they demonstrate that driving scenarios for simulator studies can be manipulated in such a way to mimic the mental workload imposed by similar on-road driving contexts. A more systematic examination of the interactions between aging and driving complexity may provide insights into the events leading to driving errors made by older drivers.

Acknowledgments

This work was supported by grants from the Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies-Soutien aux équipes de recherche (NT and MS) and AUTO21 grant number F203-FCO (NT and MS). Martin Lavallière is supported by a doctorat scholarship from the Fonds de la Recherche en Santé du Québec. We affirm no conflict of interest or financial sponsorship in the conduct of this study or manuscript preparation.

References

1. Allen, R.W., 1990. Low cost, real time simulation based on microcomputers, 34th Annual Meeting of the Human Factors Society, Orlando, FL.
2. Andersen, G.J., Cisneros, J., Saidpour, A., Atchley, P., 2000. Age-related differences in collision detection during deceleration. *Psychology and Aging* 15 (2), 241-52.
3. Braitman, K.A., Kirley, B.B., Ferguson, S., Chaudhary, N.K., 2007. Factors leading to older drivers' intersection crashes. *Traffic Injury Prevention* 8 (3), 267-74.
4. Brouwer, W.H., Ponds, R.W., 1994. Driving competence in older persons. *Disability and Rehabilitation* 16 (3), 149-61.
5. Cantin, V., Blouin, J., Simoneau, M., Teasdale, N., 2004. Driving in a simulator and lower limb movement variability in elderly persons: Can we infer something about pedal errors? *Advances in Transportation Studies: An International Journal Special issue*, 39-46.
6. Cooper, P.J., 1990. Differences in accident characteristics among elderly drivers and between elderly and middle-aged drivers. *Accident Analysis and Prevention* 22 (5), 499-508.
7. Darling, W.G., Cooke, J.D., Brown, S.H., 1989. Control of simple arm movements in elderly humans. *Neurobiology of Aging* 10, 149-157.
8. de Waard, D., 1996. The measurement of drivers' mental workload, Ph. D. thesis, University of Groningen, Groningen, 127 pp.
9. de Waard, D., Brookhuis, K., 1997. On the measurement of driver workload. In: T. Rothengatter and E. Carbonell Vaya (Editors), *Traffic and transport psychology: Theory and application*. Pergamon, Amsterdam, pp. 161-171.
10. Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R., 1975. Mini-mental state. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research* 12, 189-198.
11. Hakamies-Blomqvist, L., 1994. Aging and fatal accidents in male and female drivers. *Journal of Gerontology* 49 (6), S286-90.
12. Hakamies-Blomqvist, L., Mynttinen, S., Backman, M., Mikkonen, V., 1999. Age-related differences in driving: Are older drivers more serial? *International Journal of Behavioral Development* 23 (3), 575-589.
13. Hancock, P., Lesch, M., Simmons, L., 2003. The distraction effects of phone use during a crucial driving maneuver. *Accident Analysis and Prevention* 35, 501-514.

14. Hancock, P.A., Warm, J.S., 1989. A dynamic model of stress and sustained attention. *Human Factors* 31 (5), 519-37.
15. Hancock, P.A., Wulf, G., Thom, D., Fassnacht, P., 1990. Driver workload during differing driving maneuvers. *Accident Analysis and Prevention* 22 (3), 281-90.
16. Harbluk, J.L., Noy, Y.I., Trbovich, P.L., Eizenman, M., 2007. An on-road assessment of cognitive distraction: impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis and Prevention* 39 (2), 372-9.
17. Hauer, E., 1988. The safety of older persons at intersections. *Transportation in an aging society. Special Report 218, Volumes 1 and 2, Transportation Research Board, Washington, DC.*
18. Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J., Brown, J., 2006. Driver distraction: the effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis and Prevention* 38 (1), 185-91.
19. Jahn, G., Oehme, A., Krems, J.F., Gelau, C., 2005. Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 8 (3), 255-275.
20. Kahneman, D., 1973. *Attention and effort.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
21. Langford, J., Koppel, S., 2006. Epidemiology of older driver crashes - Identifying older driver risk factors and exposure patterns. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 9 (5), 309-321.
22. Langford, J., Methorst, R., Hakamies-Blomqvist, L., 2006. Older drivers do not have a high crash risk-a replication of low mileage bias. *Accident Analysis & Prevention* 38 (3), 574-8.
23. Leufkens, T.R., Vermeeren, A., Smink, B.E., van Ruitenbeek, P., Ramaekers, J.G., 2007.
24. Cognitive, psychomotor and actual driving performance in healthy volunteers after immediate and extended release formulations of alprazolam 1 mg. *Psychopharmacology* 191 (4), 951-9.
25. Makishita, H., Matsunaga, K., 2008. Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload. *Accident Analysis and Prevention* 40 (2), 567-75.
26. Mayhew, D.R., Simpson, H.M., Ferguson, S.A., 2006. Collisions involving senior drivers: highrisk conditions and locations. *Traffic Injury Prevention* 7 (2), 117-24.
27. McGwin, G.J., Brown, D., 1999. Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis and Prevention* 31 (3), 181-198.

28. Mortimer, R.G., Segel, L., Dugoff, H., Campbell, J.D., Jorgeson, C.M., Murphy, R.W., 1970. Brake force requirement study: driver-vehicle braking performance as a function of brake system design variables. In: University of Michigan Highway Safety Research Institute, Report HuF-6 (Editor).
29. Neumann, O., 1996. Theories of attention. In: O. Neumann and A.F. Sanders (Editors),
30. Handbook of perception and action. Volume 3. Attention. Academic Press, London, pp. 389-446.
31. O'Donnell, B.F., Cohen, R.A., 1993. Attention: A component of information processing. In: R.A. Cohen (Editor), The neuropsychology of attention. Plenum Press, New York, pp. 11-48.
32. O'Hanlon, J.F., Haak, T.W., Blaauw, G.J., Riemersma, J.B., 1982. Diazepam impairs lateral position control in highway driving. *Science* 217 (4554), 79-81.
33. Owsley, C., Ball, K., McGwin, G., Jr., Sloane, M.E., Roenker, D.L., White, M.F., Overley, E.T., 1998. Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults. *Journal of the American Medical Association* 279 (14), 1083-8.
34. Oxley, J., Fildes, B., Corben, B., Langford, J., 2006. Intersection design for older drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 9 (5), 335-346.
35. Patten, C.J., Kircher, A., Ostlund, J., Nilsson, L., 2004. Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation. *Accident Analysis and Prevention* 36 (3), 341-50.
36. Patten, C.J., Kircher, A., Ostlund, J., Nilsson, L., Svenson, O., 2006. Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accident Analysis and Prevention* 38 (5), 887-94.
37. Pinto, M., Cavallo, V., Ohlmann, T., 2008. The development of driving simulators: Toward a multisensory solution. *Le Travail Humain* 71 (1), 62-95.
38. Planek, T.W., Fowler, R.C., 1971. Traffic accident problems and exposure characteristics of the aging driver. *Journal of Gerontology* 26 (2), 224-30.
39. Preusser, D.F., Williams, A.F., Ferguson, S.A., Ulmer, R.G., Weinstein, H.B., 1998. Fatal crash risk for older drivers at intersections. *Accident Analysis and Prevention* 30 (2), 151-9.
40. Ratcliff, R., 1993. Methods for dealing with reaction time outliers. *Psychological Bulletin* 114 (3), 510-32.

41. Rizzo, M., McGehee, D.V., Dawson, J.D., Anderson, S.N., 2001. Simulated car crashes at intersections in drivers with Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders* 15 (1), 10-20.
42. Rizzo, M., Stierman, L., Skaar, N., Dawson, J.D., Anderson, S.W., Vecera, S.P., 2004. Effects of a controlled auditory-verbal distraction task on older driver vehicle control. *Journal of the Transportation Research Board* (1865), 1-6.
43. Robertson, R., Vanlaar, W., 2008. Elderly drivers: Future challenges? *Accident Analysis & Prevention* 40 (6), 1982-1986.
44. Schiff, W., Oldak, R., Shah, V., 1992. Aging persons' estimates of vehicular motion. *Psychology and Aging* 7 (4), 518-525.
45. Schmidt, R.A., Lee, T.D., 2005. Motor control and learning. Human Kinetics, Champaign (ILL).
46. Schmidt, R.A., Zelaznick, H.N., Hawkins, B., Frank, J.S., Quinn, J.T., 1979. Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Research* 86, 415-451.
47. Skinner, H.B., 1984. Age-related decline in proprioception. *Clinical Orthopedics* 184, 208-211.
48. Staplin, L., Gish, K.W., Joyce, J., 2008. 'Low mileage bias' and related policy implications—a cautionary note. *Accident Analysis and Prevention* 40 (3), 1249-52.
49. Szlyk, J.P., Seiple, W., Viana, M., 1995. Relative effects of age and compromised vision on driving performance. *Human Factors* 37 (2), 430-6.
50. Teasdale, N., Cantin, V., Desroches, G., Blouin, J., Simoneau, M., 2004. Attentional demands while driving in a simulator: effects of driving straights on open roads, approaching intersections and doubling maneuvers. *Advances in Transportation Studies: An International Journal (Special Issue)*, 29-38.
51. Tsang, P., Wilson, G.F., 1997. Mental workload. In: G. Salvendy (Editor), *Handbook of human factors and ergonomics*. Wiley-Interscience Publication, New York, pp. 417-449.
52. Verbaken, J.H., 1989. Contrast sensitivity testing with low contrast acuity charts: manufacturer's guide *Australian Vision Charts*, Melbourne, Australia.
53. Verwey, W., 2000. On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures. *Ergonomics* 43 (2), 187-209.

Chapitre 6 Conclusion

La thématique principale de cette thèse porte sur l'évaluation des conducteurs âgés. L'objectif principal était de documenter la performance des conducteurs âgés en bonne santé et asymptomatiques dans différents contextes de conduite simulée. L'originalité repose sur le fait que toutes les études ont été réalisées dans un environnement dynamique et que nous avons observé simultanément l'ensemble de la performance des conducteurs dans un environnement bien contrôlé. Pour en arriver à réaliser l'ensemble de ces études, une méthodologie permettant de quantifier la charge cognitive imposée par les scénarios a été développée. Plus spécifiquement, les objectifs de cette thèse étaient de/d' :

- Documenter les stratégies de recherche visuelle des conducteurs incluant les conducteurs âgés dans un contexte dynamique de conduite et d'évaluer si les déficits oculaires et de recherche d'informations habituellement rapportés chez les personnes âgées sont affectés par une variation des contextes de conduite.
- Examiner si la performance des conducteurs est affectée par la charge cognitive imposée par les différentes situations de conduite.

La première étude (chapitre 2) avait pour objectif la mise en place d'une méthode permettant l'évaluation de la charge cognitive imposée par les différents scénarios de conduite présentés. Cette étape était primordiale car sans cette méthode, il nous était impossible de quantifier la difficulté des contextes présentés et d'ainsi observer le comportement des conducteurs soumis à ces différentes situations de conduite. La méthode utilisée pour mesurer la charge cognitive a finalement été la technique du temps de réaction inattendu. Cette technique est dérivée de la méthode de la tâche secondaire et consiste à faire exécuter une tâche secondaire simultanément à la tâche primaire. Dans notre étude, la tâche primaire consistait à conduire le simulateur et la tâche secondaire à répondre vocalement (« top ») aussi rapidement que possible suite à la présentation d'un stimulus sonore. Il est assumé que la réalisation d'une tâche nécessite une certaine proportion des capacités attentionnelles et que si une deuxième tâche est réalisée simultanément et que l'ensemble requière plus de ressources que la capacité totale, la performance à l'une ou aux deux tâches sera affectée négativement (Kahneman 1973; Shinar, McDowell et al. 1978).

Nous avons opté pour un stimulus sonore et une réponse vocale pour éviter les interférences physiques. Les sujets ont reçu pour consigne de privilégier, en tout temps, la tâche de conduite. Ainsi, l'observation d'une augmentation du temps de réaction pour certains contextes de conduite sera perçue comme une augmentation de la charge cognitive allouée à la conduite du simulateur. Les résultats observés se sont avérés très intéressants. Ils ont montré que la conduite d'un simulateur, même dans un contexte très simple comme la conduite en ligne droite, augmentait la charge cognitive d'une façon importante par rapport à la condition contrôle. Le temps de réaction des conducteurs lors de la condition ligne droite a été plus de 200 ms plus long que pour la condition contrôle. Ces résultats supportent les auteurs qui prétendent que la conduite ne devrait jamais être considérée comme une tâche automatique (Groeger and Clegg 1997; Hancock, Lesch et al. 2003). De plus, les différences observées pour les deux autres contextes de conduite étaient encore plus importantes. Pour certaines intersections, le temps de réaction mesuré pouvait être plus de 4 fois supérieur à la valeur de base des sujets et ce même si les situations présentées aux conducteurs étaient toutes des situations normales de conduite qu'il est possible de rencontrer sur la route tous les jours. Ces résultats confirment expérimentalement les données provenant des bases de données des organismes réglementaires en conduite qui montrent que les intersections et les manœuvres de dépassement représentent certaines des conditions de conduite les plus difficiles et risquées (Hauer 1988; Cooper 1990; Owsley, Ball et al. 1998).

Lors de l'étude n°4 (chapitre 5), nous avons repris le protocole développé lors de la première étude (chapitre 2) et nous avons analysé la charge cognitive des conducteurs jeunes et âgés. Cette étude nous a permis de répliquer les résultats de la première étude à savoir que la charge cognitive des conducteurs est plus grande lors de la conduite d'un simulateur que lors d'une condition de référence mais inférieure à celle observée lors de situations complexes comme la négociation d'une intersection où le dépassement d'un véhicule plus lent. Toutefois, même si le temps de réaction de base des participants âgés était similaire à celui des conducteurs plus jeunes, l'augmentation du temps de réaction des personnes âgées a été plus importante pour tous les contextes de conduite que celle des jeunes conducteurs. Ainsi, pour un scénario de conduite donné, les conducteurs âgés ont montré une charge cognitive plus importante que les conducteurs plus jeunes et ce même

s'ils ont adopté une vitesse de conduite plus basse ce qui est souvent considéré comme une stratégie compensatoire permettant de diminuer la charge cognitive (Mourant and Rockwell 1972; Wood 1999; Cantin, Blouin et al. 2004). De plus, même si le nombre d'occurrences demeure relativement faible, les conducteurs âgés ont omis de répondre à un stimulus plus souvent que les conducteurs plus jeunes. Ce résultat peut être une indication de ce que Hancock et Warn (1989) ont nommé l'état de surcharge qui correspond à une surcharge attentionnelle qui amène une dégradation importante et soudaine de la performance. En ayant une charge cognitive plus élevée que les jeunes conducteurs, il est possible que les personnes âgées se retrouvent en permanence plus près du seuil de cassure qui fait basculer le conducteur en état de surcharge.

Une analyse des clignements endogènes des yeux a également été réalisée. Les clignements endogènes des yeux sont des mouvements involontaires qui permettent de lubrifier la cornée et qui peuvent être distingués des autres clignements (réflexes et volontaires) par l'absence d'un stimulus identifiable (Stern, Walrath et al. 1984). Une relation inverse a régulièrement été observée entre la charge cognitive et la fréquence des clignements (Drew 1951; Baumstimler and Parrot 1971; Bauer, Goldstein et al. 1987). Cette diminution de la fréquence des clignements dans les contextes où la charge cognitive est importante est souvent attribuée à la nécessité de perdre le moins d'informations possibles (Drew 1951; Baumstimler and Parrot 1971). Ainsi, nous étions optimistes de pouvoir utiliser cette technique pour quantifier la charge cognitive en continu. De plus, il s'agit d'une méthode qui aurait facilement pu être utilisée lors de projets éventuels sur circuit routier. Malheureusement, cette tentative s'est avérée infructueuse et les résultats n'ont pas été publiés ni présentés à ce jour. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet échec. Premièrement, il s'agit d'une mesure excessivement variable et la qualité de la mesure peut en souffrir lorsqu'utilisée pour quantifier la charge cognitive (Stern, Boyer et al. 1994). La qualité de l'air, les facteurs intra individuels, le niveau de fatigue, le fait qu'un clignement puisse être volontaire ou déclenché par une réaction réflexe provoquée par une stimulation lumineuse, un corps étranger ou même une stimulation sonore sont tous des facteurs qui peuvent influencer la fréquence des clignements endogènes. De plus, cette idée d'utiliser les clignements endogènes comme variable de la charge cognitive nous est venue à posteriori de l'acquisition des données ce qui fait que nous avons été dans l'incapacité d'obtenir une

mesure de base dans un environnement contrôlé. Des tentatives de normalisation par rapport à un nombre de clignement obtenu sur une section monotone du scénario ont été réalisées mais n'ont pas été concluantes. Néanmoins, l'acquisition d'une valeur de base aurait été importante puisque la variabilité inter sujet de cette mesure est importante. Finalement, l'acquisition des clignements a été effectuée à l'aide d'un oculomètre qui fournit la dimension de la pupille en continu. Ainsi quand la valeur de la pupille est à 0, il est considéré que l'œil est fermé. Certains paramètres peuvent être ajoutés pour raffiner le traitement comme la durée du clignement mais il demeure en tout temps impossible de parfaitement discriminer un mouvement volontaire d'un mouvement involontaire ou même d'une perte du signal. L'utilisation d'un appareil électrooculographique (EOG) aurait permis d'obtenir la variation du potentiel d'action entre la cornée et la rétine (la paupière agit comme une résistance). L'analyse de ce signal permet d'obtenir des informations supplémentaires comme la vitesse de fermeture de la paupière ce qui nous aurait aidé à nettoyer les données et à conserver uniquement les clignements endogènes. Néanmoins, avant de rejeter l'utilisation de cette technique, il serait intéressant de faire quelques expérimentations supplémentaires pour bien comprendre les facteurs affectant la fréquence des clignements et tenter de contrôler ce qui est contrôlable.

Une analyse parallèle a été menée sur la performance de conduite lors des quinze intersections du scénario. Pour chacun des sujets, nous avons ordonné les intersections en fonction du temps de réaction (de 1 à 15, 1 correspondant au temps de réaction le plus rapide). Trois intersections se sont retrouvées parmi les temps de réaction les plus courts (charge cognitive basse) et trois autres parmi les plus longs (charge cognitive élevée) pour pratiquement tous les sujets. À partir de ces deux nouvelles catégories, nous avons observé que la charge cognitive imposée par une intersection (basse, élevée) affectait la performance de conduite des deux groupes de conducteur. Les variables habituelles comme la vitesse et la variabilité du déplacement latéral du véhicule ont été affectées par la charge cognitive. Les conducteurs ont conduit moins rapidement et ont montré une variabilité plus importante pour les intersections imposant une charge cognitive élevée. Pour les deux groupes de sujets, nous avons observé un nombre d'événements de freinage (pic de décélération excédant 0.1 g) plus élevé pour les intersections imposant une charge cognitive élevée. Ces résultats sont très intéressants parce qu'ils montrent une relation directe entre la

performance et le niveau de charge cognitive imposée par la situation de conduite. De plus, les conducteurs âgés ont montré la même dégradation de la performance que les jeunes conducteurs mais à un niveau plus important.

Les deux études précédentes montrent que la conduite est loin d'être une tâche automatique même lorsqu'elle est réduite à son minimum puisque toutes les tâches connexes à la conduite comme, par exemple, l'ajustement de la radio, les conversations au téléphone cellulaire, les conversations avec les passagers ou l'utilisation d'un système de positionnement par satellite étaient interdites. Toutes ces tâches, sans exception, nécessitent une quantité de ressources attentionnelles et diminuent la proportion de ressources disponibles pour la conduite.

Les deux études (chapitres 3 et 4) sur les mouvements oculaires ont également montré des résultats intéressants. La première approche a été d'analyser les différents contextes de conduite à partir des variables usuelles telles que le nombre de fixation, la durée des fixations et la variance du balayage vertical et horizontal. Les résultats observés ont montré une diminution du champ visuel des conducteurs âgés, mais dans l'ensemble les comportements oculaires ont été très similaires entre les deux groupes. Par la suite, une analyse qualitative basée sur la comptabilisation de matrices des distributions des fixations et des séquences de fixation (matrices de Markov) a été effectuée. Cette analyse a montré que les patrons de séquences de fixations des conducteurs jeunes et âgés étaient robustes et résistants à une augmentation de la charge cognitive. Plus important encore, l'augmentation de la charge cognitive a fait émerger des séquences de fixations qui n'étaient pas présentes lors de la condition ligne droite. Toutes les séquences de fixation significatives pour le contexte intersection se sont terminées au centre de la scène visuelle montrant l'importance de cette région pour la négociation d'une intersection.

L'analyse qualitative des fixations a fait ressortir une observation intéressante. Bien que celle-ci ne soit pas quantifiable à partir des données recueillies, nous avons noté que l'incertitude associée aux comportements de certains objets avait un potentiel attracteur important au niveau de l'attention visuelle des participants et que cette incertitude semblait faire augmenter la charge cognitive des conducteurs lors des événements de conduite concernés. Par exemple, un enfant en bordure de la route dont il est difficile de prévoir le

prochain déplacement semble influencer à la hausse la charge cognitive des conducteurs en comparaison à une personne adulte se trouvant au même endroit que l'enfant mais dont les comportements sont prévisibles pour le conducteur. La même observation a été faite à propos des autres véhicules. Un automobiliste ayant un comportement difficilement prévisible semble causer une augmentation de la charge cognitive d'une façon importante contrairement à un véhicule se déplaçant à vitesse constante avec une trajectoire rectiligne. Plusieurs raisons peuvent expliquer l'imprévisibilité d'un conducteur. Il peut évidemment s'agir d'un problème de comportement (excès de vitesse, dépassement à droite, utilisation d'un téléphone cellulaire etc.), mais cette imprévisibilité peut également être causée par des facteurs externes. Ceux-ci peuvent avoir pour cause la température (brouillard, poudrierie etc.), l'environnement (éclairage, courbe etc.) ou encore la grosseur et/ou la teinte des vitres du véhicule qui précède et qui empêche le conducteur de voir ce qui se passe devant et d'anticiper les situations à venir. Un autre facteur dont nous devons maintenant tenir compte concerne la charge cognitive des conducteurs (Cantin, Lavallière et al. 2009). Puisque nous avons montré que la charge cognitive modifie la performance de conduite et que le vieillissement affecte la charge cognitive des conducteurs, un conducteur âgé se retrouvant dans une situation de conduite donnée se comportera différemment des conducteurs plus jeunes et son comportement et ses décisions seront parfois difficiles à anticiper pour les autres conducteurs. Ajoutez à ce cocktail quelques conducteurs impatients, quelques jeunes avec des problèmes de comportements et quelques conducteurs en conversation au téléphone cellulaire et nous nous retrouvons avec un ensemble de conducteurs en mode réactif susceptibles de faire des erreurs qui pourraient mener à un accident.

Il est bien documenté que les personnes âgées éprouvent des difficultés à estimer la vitesse et les distances notamment pour traverser la rue (Lobjois and Cavallo 2007; Lobjois and Cavallo 2009). Certaines observations dans nos études semblent refléter cette difficulté. Premièrement, l'analyse des dépassements a montré que les personnes âgées accordaient une proportion plus importante de leur temps d'inspection visuelle aux utilisateurs que les jeunes conducteurs. Il est probable que ce résultat reflète des difficultés à estimer la vitesse du véhicule à dépasser et à trouver le bon moment pour le faire. Deuxièmement, à l'approche d'une intersection, les personnes âgées ont grandement diminué la proportion de

temps accordée à l'odomètre et la transition significative entre l'odomètre et le centre de la route est disparue pour la condition intersection. Ce résultat suggère que les personnes âgées préfèrent conserver les yeux sur la scène visuelle pour estimer leur décélération plutôt que de se fier à l'odomètre. Puisque nous avons observé chez les conducteurs âgés des patrons de freinage dominés par de nombreux pics de décélération (pics de décélération >0.1 g), la stratégie semble pour le moins inefficace.

En conclusion, cette thèse montre que la conduite d'un simulateur est loin d'être une tâche automatique et que la charge cognitive peut augmenter significativement pour les contextes complexes de conduite comme la négociation d'une intersection ou les manœuvres de dépassement. Dans l'ensemble, les personnes âgées ont montré une charge cognitive plus importante que les conducteurs plus jeunes dans tous les contextes de conduite. La performance de conduite a également été modifiée par l'augmentation de la charge cognitive. Une vitesse moins importante, une variabilité plus grande du déplacement latéral et un nombre d'événements de freinage (pic de décélération excédant $0.1g$) plus élevé pour les intersections imposant une charge cognitive élevée ont notamment été observées. Ces résultats montrent une relation directe entre la performance et le niveau de charge cognitive imposé par la situation de conduite. Les conducteurs âgés ont montré une dégradation de la performance similaire à celle des jeunes conducteurs mais à un niveau plus important. Cependant l'analyse des comportements oculaires n'a pas montré de différences importantes entre nos deux groupes de sujet même si une diminution du champ visuel des conducteurs âgés a été observée et que certaines tendances ont été relevées notamment au niveau des patrons de balayage visuel de la scène. L'absence de différences probantes peut avoir été causée par la population de personnes âgées évaluées qui étaient relativement jeunes et en bonne santé. Malgré tout, nos résultats ne supportent pas totalement l'opinion de certains auteurs (Ball, Owsley et al. 1993; Underwood, Phelps et al. 2005) voulant que les personnes âgées relativement jeunes et en bonne santé ne constituent pas un risque augmenté pour la sécurité routière puisque plusieurs altérations de la performance de conduite ont été notées.

Bibliographie

- Aasman, J., G. Mulder, et al. (1987). "Operator effort and the measurement of heart-rate variability." Hum Factors **29**(2): 161-70.
- Allan, J. A., R. S. Schroeder, et al. (1974). "Effects of head restriction on drivers head movements and errors in simulated dangerous situations." J Appl Psychol **59**: 643-648.
- Alm, H. and L. Nilsson (1994). "Changes in driver behaviour as a function of handsfree mobile phones--a simulator study." Accid Anal Prev **26**(4): 441-51.
- Alm, H. and L. Nilsson (1995). "The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation." Accid Anal Prev **27**(5): 707-15.
- Amrhein, P. C., G. E. Stelmach, et al. (1991). "Age differences in the maintenance and restructuring of movement preparation." Psychol Aging **6**(3): 451-66.
- Babarik, P. (1968). "Automobile accidents and driver reaction pattern." J Appl Psychol **52**(1): 49-54.
- Backs, R. W. and K. A. Seljos (1994). "Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: the effects of level of difficulty in a working memory task." Int J Psychophysiol **16**(1): 57-68.
- Bahill, A. T., D. Adler, et al. (1975). "Most naturally occurring human saccades have magnitudes of 15 degrees or less." Invest Ophthalmol **14**(6): 468-9.
- Bahrck, H. P., M. Noble, et al. (1954). "Extra-task performance as a measure of learning a primary task." J Exp Psychol **48**(4): 298-302.
- Ball, K. and C. Owsley (1993). "The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function." J Am Optom Assoc **64**(1): 71-9.
- Ball, K., C. Owsley, et al. (1993). "Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers." Invest Ophthalmol Vis Sci **34**(11): 3110-23.
- Ball, K., C. Owsley, et al. (1998). "Driving avoidance and functional impairment in older drivers." Accid Anal Prev **30**(3): 313-22.
- Ball, K. K., B. L. Beard, et al. (1988). "Age and visual search: expanding the useful field of view." J Opt Soc Am A **5**(12): 2210-9.
- Baloh, R. W., J. Enrietto, et al. (2001). "Age-related changes in vestibular function: a longitudinal study." Ann N Y Acad Sci **942**: 210-9.
- Bauer, L. O., R. Goldstein, et al. (1987). "Effects of information-processing demands on physiological response patterns." Hum Factors **29**(2): 213-34.
- Baulk, S. D., L. A. Reyner, et al. (2001). "Driver sleepiness--evaluation of reaction time measurement as a secondary task." Sleep **24**(6): 695-8.
- Baumstimler, Y. and J. Parrot (1971). "Stimulus generalization and spontaneous blinking in man involved in a voluntary activity." J Exp Psychol **88**(1): 95-102.
- Beatty, J. (1982). "Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources." Psychol Bull **91**(2): 276-92.
- Bedard, M., B. Weaver, et al. (2008). "Predicting driving performance in older adults: we are not there yet!" Traffic Inj Prev **9**(4): 336-41.
- Bedard, M., I. Isherwood, et al. (2004). "Evaluation of a re-training program for older drivers." Can J Public Health **95**(4): 295-8.
- Bedard, M., M. M. Porter, et al. (2008). "The combination of two training approaches to improve older adults' driving safety." Traffic Inj Prev **9**(1): 70-6.

- Beede, K. E. and S. J. Kass (2006). "Engrossed in conversation: the impact of cell phones on simulated driving performance." Accid Anal Prev **38**(2): 415-21.
- Bella, F. (2008). "Driving simulator for speed research on two-lane rural roads." Accid Anal Prev **40**(3): 1078-87.
- Bemben, M. G. (1998). "Age-related alterations in muscular endurance." Sports Med **25**(4): 259-69.
- Berneiss, D. J., H. M. Simpson, et al. (2002). *The road safety monitor: Driver Distraction*. T. I. R. Foundation. Ottawa.
- Boles, D. B., J. H. Bursk, et al. (2007). "Predicting dual-task performance with the Multiple Resources Questionnaire (MRQ)." Hum Factors **49**(1): 32-45.
- Boles, D. B. and M. B. Law (1998). "A simultaneous task comparison of differentiated and undifferentiated hemispheric resource theories." J Exp Psychol Hum Percept Perform **24**(1): 204-15.
- Bootsma, R. J. and R. R. Oudejans (1993). "Visual information about time-to-collision between two objects." J Exp Psychol Hum Percept Perform **19**(5): 1041-52.
- Bourbeau, R. and C. Noël (1997). *Effets des changements démographiques sur le bilan routier au Québec*. Montréal, Centre de recherche sur les transports: 156.
- Brink, E. E. and R. Mackel (1987). "Sensorimotor performance of the hand during peripheral nerve regeneration." J Neurol Sci **77**(2-3): 249-66.
- Broadbent, D. (1970). *Stimulus set and response set: Two kinds of selective attention*. Attention : contemporary theory and analysis. D. I. Mostofsky. New York, Appleton-Century-Crofts: viii, 447 p.
- Broadbent, D. E. (1958). Perception and communication. Toronto., Pergamon Press.
- Brookhuis, K. A., G. de Vries, et al. (1991). "The effects of mobile telephoning on driving performance." Accid Anal Prev **23**(4): 309-16.
- Brookhuis, K. A., D. De Waard, et al. (1994). "Measuring driving performance by car-following in traffic." Ergonomics **37**: 427-434.
- Bruce, M. F. (1980). "The relation of tactile thresholds to histology in the fingers of elderly people." J Neurol Neurosurg Psychiatry **43**(8): 730-4.
- Buchman, A. S., S. Leurgans, et al. (2000). "Effect of age and gender in the control of elbow flexion movements." J Mot Behav **32**(4): 391-9.
- Burton-Danner, K., C. Owsley, et al. (2001). "Aging and feature search: the effect of search area." Exp Aging Res **27**(1): 1-18.
- Bylsma, F. W. (1997). "Simulators for assessing driving skills in demented patients." Alzheimer Dis Assoc Disord **11 Suppl 1**: 17-20.
- Camus, J.-F. (1996). La Psychologie cognitive de l'attention. Paris, A. Colin : Masson.
- Cantin, V., J. Blouin, et al. (2004). "Driving in a simulator and lower limb movement variability in elderly persons: can we infer something about pedal errors." Advances in Transportation Studies: An International Journal(Special): 39-46.
- Cantin, V., M. Lavallière, et al. (2009). "Mental workload when driving in a simulator: effects of age and driving complexity." Accid Anal Prev **41**(4): 763-77.
- Carroll, D. and L. Rhys-Davies (1979). "Heart rate changes with exercise and voluntary heart rate acceleration." Biol Psychol **8**(4): 241-52.
- Carroz, A., P. A. Comte, et al. (2008). "[Relevance of a driving simulator in the assessment of handicapped individuals.]." Ann Readapt Med Phys **51**(5): 358-65.
- Carter, J. E., L. Obler, et al. (1983). "The effect of increasing age on the latency for saccadic eye movements." J Gerontol **38**(3): 318-20.

- Casali, J. G. and W. W. Wierwille (1983). "A comparison of rating scale, secondary-task, physiological, and primary-task workload estimation techniques in a simulated flight task emphasizing communications load." Hum Factors **25**(6): 623-41.
- Casali, J. G. and W. W. Wierwille (1984). "On the measurement of pilot perceptual workload: a comparison of assessment techniques addressing sensitivity and intrusion issues." Ergonomics **27**(10): 1033-50.
- Cerrelli, E. (1992). *Crash Data and Rates for Age-sex Groups of Drivers, 1990*. U. N. R. Note. Washington, DC, National Center for Statistics and Analysis.
- Chapman, P. R. and G. Underwood (1998). "Visual search of driving situations: danger and experience." Perception **27**(8): 951-64.
- Chun, M. M. (2000). "Contextual cueing of visual attention." Trends Cogn Sci **4**(5): 170-178.
- Coeckelbergh, T. R., W. H. Brouwer, et al. (2002). "The effect of visual field defects on driving performance: a driving simulator study." Arch Ophthalmol **120**(11): 1509-16.
- Cohen, R. A. and W. F. Waters (1985). "Psychophysiological correlates of levels and stages of cognitive processing." Neuropsychologia **23**(2): 243-56.
- Cole, K. J., D. L. Rotella, et al. (1998). "Tactile impairments cannot explain the effect of age on a grasp and lift task." Exp Brain Res **121**(3): 263-9.
- Cooke, J. D., S. H. Brown, et al. (1989). "Kinematics of arm movements in elderly humans." Neurobiol Aging **10**(2): 159-65.
- Cooper, G. E. and R. P. Harper (1969). *The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities*. Moffett Field, CA, NASA-Ames Research Center: 56.
- Cooper, P. J. (1990). "Differences in accident characteristics among elderly drivers and between elderly and middle-aged drivers." Accid Anal Prev **22**(5): 499-508.
- Cooper, R., J. W. Osselton, et al. (1974). EEG technology [by] R. Cooper, J.W. Osselton [and] J.C. Shaw. London, Butterworths.
- Cooper, R. L. (1990). "Blind registrations in Western Australia: a five-year study." Aust N Z J Ophthalmol **18**(4): 421-6.
- Crossman, E. R. and P. J. Goodeve (1983). "Feedback control of hand-movement and Fitts' Law." Q J Exp Psychol A **35**(Pt 2): 251-78.
- Crundall, D., P. Chapman, et al. (2003). "Eye movements and hazard perception in police pursuit and emergency response driving." J Exp Psychol Appl **9**(3): 163-74.
- Crundall, D. and G. Underwood (1998). "Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers." Ergonomics **41**(4): 448-458.
- Crundall, D., G. Underwood, et al. (1999). "Driving experience and the functional field of view." Perception **28**(9): 1075-87.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*. Traffic Research Centre. Haren, University of Groningen.
- Decina, L. E. and L. Staplin (1993). "Retrospective evaluation of alternative vision screening criteria for older and younger drivers." Accid Anal Prev **25**(3): 267-75.
- Del Rio, M. C. and F. J. Alvarez (2003). "Medication and fitness to drive." Pharmacoepidemiol Drug Saf **12**(5): 389-94.
- Deutsch, J. A. and D. Deutsch (1963). "Some theoretical considerations." Psychol Rev **70**: 80-90.
- Direct Line Motor Insurances (2002). *The mobile phone report: A report of the effects of using a hand-held and hands-free mobile phone*.

- Drew, G. C. (1951). "Variations in reflex blink-rate during visual motor tasks." Q J Exp Psychol **3**(2): 73-88.
- Duchek, J. M., L. Hunt, et al. (1998). "Attention and driving performance in Alzheimer's disease." J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci **53**(2): P130-41.
- Dulisse, B. (1997). "Older drivers and risk to other road users." Accid Anal Prev **29**(5): 573-82.
- Dussault, C., J. C. Jouanin, et al. (2005). "EEG and ECG changes during simulator operation reflect mental workload and vigilance." Aviat Space Environ Med **76**(4): 344-51.
- Eggemeier, F. T. and G. F. Wilson (1991). Subjective and performancebased assessment of workload in multitask environments. Multiple-task performance. D. L. Damos. London, Taylor & Francis: 217-278.
- Elvik, R. and A. B. Mysen (1999). "Incomplete Accident Reporting: Meta-Analysis of Studies Made in 13 Countries." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(1665): 133-140.
- Erim, Z., M. F. Beg, et al. (1999). "Effects of aging on motor-unit control properties." J Neurophysiol **82**(5): 2081-91.
- Evans, D. W. and A. P. Ginsburg (1985). "Contrast sensitivity predicts age-related differences in highway-sign discriminability." Hum Factors **27**(6): 637-42.
- Evans, L. (2004). Traffic safety, Bloomfield Hills.
- Falkmer, T. and N. P. Gregersen (2005). "A comparison of eye movement behavior of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments." Optom Vis Sci **82**(8): 732-9.
- Fitts, P. M. (1954). "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement." J Exp Psychol **47**(6): 381-91.
- Fogarty, C. and J. A. Stern (1989). "Eye movements and blinks: their relationship to higher cognitive processes." Int J Psychophysiol **8**(1): 35-42.
- Foley, D. J., R. B. Wallace, et al. (1995). "Risk factors for motor vehicle crashes among older drivers in a rural community." J Am Geriatr Soc **43**(7): 776-81.
- Fozard, J. L. and Gordon-Salant (2001). Changes in vision and hearing with aging. Handbook of the psychology of aging J. E. B. a. K. W. Schaie. San Diego, Academic Press.
- Fozard, J. L., M. Vercryssen, et al. (1994). "Age differences and changes in reaction time: the Baltimore Longitudinal Study of Aging." J Gerontol **49**(4): P179-89.
- Freund, B., L. A. Colgrove, et al. (2005). "Self-rated driving performance among elderly drivers referred for driving evaluation." Accid Anal Prev **37**(4): 613-8.
- Freund, B., S. Gravenstein, et al. (2002). "Evaluating driving performance of cognitively impaired and healthy older adults: a pilot study comparing on-road testing and driving simulation." J Am Geriatr Soc **50**(7): 1309-10.
- Fukuda, K., J. A. Stern, et al. (2005). "Cognition, blinks, eye-movements, and pupillary movements during performance of a running memory task." Aviat Space Environ Med **76**(7 Suppl): C75-85.
- Gabaude, C. (2002). Contribution à l'étude de la perception visuo-attentionnelle : Exploration des effets du vieillissement et développement d'un outil d'aide au diagnostic et de suivi. INRETS. Lyon: 247.
- Glassbrenner, D. (2005). Driver cell phone use in 2005, overall results. Washington, DC, NHTSA.

- Goggin, N. L. and H. J. Meeuwse (1992). "Age-related differences in the control of spatial aiming movements." Res Q Exerc Sport **63**(4): 366-72.
- Goldsmith, M. and M. Yeari (2003). "Modulation of object-based attention by spatial focus under endogenous and exogenous orienting." J Exp Psychol Hum Percept Perform **29**(5): 897-918.
- Goldstein, R., L. O. Bauer, et al. (1992). "Effect of task difficulty and interstimulus interval on blink parameters." Int J Psychophysiol **13**(2): 111-7.
- Goodman, M. J., F. D. Bents, et al. (1997). "An Investigation of the Safety Implications of Wireless Communications in Vehicles." Retrieved June 2007, 2007.
- Goodman, M. J., L. Tijerina, et al. (1999). "Using cellular telephones in vehicles: Safe or unsafe?" Trans Hum Factors **1**(1): 3-42.
- Goodrick, C. L. (1980). "Effects of long-term voluntary wheel exercise on male and female Wistar rats. I. Longevity, body weight, and metabolic rate." Gerontology **26**(1): 22-33.
- Gras, M. E., M. Cunill, et al. (2007). "Mobile phone use while driving in a sample of Spanish university workers." Accid Anal Prev **39**(2): 347-55.
- Groeger, J. and B. Clegg (1997). Automaticity and driving: time to change gear? Traffic and transport psychology: Theory and application. T. R. E. C. Vaya. Amsterdam, Pergamon: 137-146.
- Groeger, J. A. (1999). Expectancy and control: Perceptual and cognitive aspects of the driving task. Human performance and ergonomics. P. A. Hancock. New-York, Academic: xxiv, 397 p.
- Groeger, J. A. and I. D. Brown (1989). "Assessing one's own and others' driving ability: influences of sex, age, and experience." Accid Anal Prev **21**(2): 155-68.
- Haigney, D. and S. J. Westerman (2001). "Mobile (cellular) phone use and driving: a critical review of research methodology." Ergonomics **44**(2): 132-43.
- Haigney, D. E., R. G. Taylor, et al. (2000). "Concurrent mobile (cellular) phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes." Trans Res F **3**(3): 113-121.
- Hakamies-Blomqvist, L., K. Johansson, et al. (1996). "Medical screening of older drivers as a traffic safety measure--a comparative Finnish-Swedish evaluation study." J Am Geriatr Soc **44**(6): 650-3.
- Hakamies-Blomqvist, L., S. Mynttinen, et al. (1999). "Age-related differences in driving: Are older drivers more serial?" Int J Behav Devel **23**(3): 575-589.
- Hakamies-Blomqvist, L. and B. Peters (2000). "Recent European research on older drivers." Accid Anal Prev **32**(4): 601-7.
- Hakamies-Blomqvist, L., T. Raitanen, et al. (2002). "Driver ageing does not cause higher accident rates per km." Trans Res F **5**: 271-274.
- Hakamies-Blomqvist, L. E. (1993). "Fatal accidents of older drivers." Accid Anal Prev **25**(1): 19-27.
- Hale, S., J. Myerson, et al. (1987). "General slowing of nonverbal information processing: evidence for a power law." J Gerontol **42**(2): 131-6.
- Hancock, P. A., M. Lesch, et al. (2003). "The distraction effects of phone use during a crucial driving maneuver." Accid Anal Prev **35**(4): 501-14.
- Hancock, P. A., L. Simmons, et al. (1999). "The effects of in-vehicle distraction on driver response during a crucial driving maneuvers." Trans Hum Factors **1**(4): 295-309.

- Hancock, P. A. and J. S. Warm (1989). "A dynamic model of stress and sustained attention." *Hum Factors* **31**(5): 519-37.
- Handy, T. C., M. Soltani, et al. (2001). "Perceptual load and visuocortical processing: event-related potentials reveal sensory-level selection." *Psychol Sci* **12**(3): 213-8.
- Harbluk, J. L., Y. I. Noy, et al. (2002). The impact of cognitive distraction on driver visual behaviour and vehicle control. Ottawa, Transport Canada.
- Harbluk, J. L., Y. I. Noy, et al. (2007). "An on-road assessment of cognitive distraction: impacts on drivers' visual behavior and braking performance." *Accid Anal Prev* **39**(2): 372-9.
- Hauer, E. (1988). The Safety of Older Persons at Intersections. Transportation in an Aging Society. Washington, DC, Transportation Research Board.
- Higgins, K. E., J. Wood, et al. (1998). "Vision and driving: selective effect of optical blur on different driving tasks." *Hum Factors* **40**(2): 224-32.
- Hill, S. G., H. P. Iavecchia, et al. (1992). "Comparison of four subjective workload rating scales." *Hum Factors* **34**: 429-39.
- Hoffman, L., J. M. McDowd, et al. (2005). "The role of visual attention in predicting driving impairment in older adults." *Psychol Aging* **20**(4): 610-22.
- Holland, C. A. (1993). "Self-bias in older drivers' judgments of accident likelihood." *Accid Anal Prev* **25**(4): 431-41.
- Holloszy, J. O. (1993). "Exercise increases average longevity of female rats despite increased food intake and no growth retardation." *J Gerontol* **48**(3): B97-100.
- Horne, J. A. and L. A. Reyner (1996). "Counteracting driver sleepiness: effects of napping, caffeine, and placebo." *Psychophysiology* **33**(3): 306-9.
- Huebner, K. D., M. M. Porter, et al. (2006). "Validation of an electronic device for measuring driving exposure." *Traffic Inj Prev* **7**(1): 76-80.
- Hultsch, D. F., S. W. MacDonald, et al. (2002). "Variability in reaction time performance of younger and older adults." *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* **57**(2): P101-15.
- Hyona, J., J. Tommola, et al. (1995). "Pupil dilation as a measure of processing load in simultaneous interpretation and other language tasks." *Q J Exp Psychol A* **48**(3): 598-612.
- Isler, R. B., B. S. Parsonson, et al. (1997). "Age related effects of restricted head movements on the useful field of view of drivers." *Accid Anal Prev* **29**(6): 793-801.
- Janke, M. K. (1991). "Accidents, mileage, and the exaggeration of risk." *Accid Anal Prev* **23**(2-3): 183-8.
- Johnson, C. A. and J. L. Keltner (1983). "Incidence of visual field loss in 20,000 eyes and its relationship to driving performance." *Arch Ophthalmol* **101**(3): 371-5.
- Johnson, M. A. and D. Choy (1987). "On the definition of age-related norms for visual function testing." *Appl Opt* **26**(8): 1449-1454.
- Jorna, P. G. (1992). "Spectral analysis of heart rate and psychological state: a review of its validity as a workload index." *Biol Psychol* **34**(2-3): 237-57.
- Julesz, B. and R. A. Schumer (1981). "Early visual perception." *Annu Rev Psychol* **32**: 575-627.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Kahneman, D., R. Ben-Ishai, et al. (1973). "Relation of a test of attention to road accident." *J Appl Psychol* **58**(1): 113-115.
- Kecklund, G. and T. Akerstedt (1993). "Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving." *Ergonomics* **36**(9): 1007-17.

- Keeffe, J. E., C. F. Jin, et al. (2002). "Vision impairment and older drivers: who's driving?" Br J Ophthalmol **86**(10): 1118-21.
- Keltner, J. L. and C. A. Johnson (1992). "Visual function and driving safety." Arch Ophthalmol **110**(12): 1697-8.
- Kenshalo, D. R., Sr. (1986). "Somesthetic sensitivity in young and elderly humans." J Gerontol **41**(6): 732-42.
- Kerr, B. (1973). "Processing demands during mental operations." Mem Cognit **1**: 401-412.
- Kim, K., L. Nitz, et al. (1995). "Personal and behavioral predictors of automobile crash and injury severity." Accid Anal Prev **27**(4): 469-81.
- Kirkendall, D. T. and W. E. Garrett, Jr. (1998). "The effects of aging and training on skeletal muscle." Am J Sports Med **26**(4): 598-602.
- Klein, C. S., C. L. Rice, et al. (2001). "Normalized force, activation, and coactivation in the arm muscles of young and old men." J Appl Physiol **91**(3): 1341-9.
- Kline, D. W., T. J. Kline, et al. (1992). "Vision, aging, and driving: the problems of older drivers." J Gerontol **47**(1): P27-34.
- Knowles, W. B. (1963). "Operator Loading Tasks." Hum Factors **5**: 155-61.
- Kosnik, W., L. Winslow, et al. (1988). "Visual changes in daily life throughout adulthood." J Gerontol **43**(3): P63-70.
- Kramer, A. F. (1991). Physiological metrics of mental workload: a review of recent progress. Multiple-task performance. D. L. Damos. London, Taylor & Francis: 279-328.
- Kramer, A. F., E. J. Sirevaag, et al. (1988). "Effects of foveal task load on visual-spatial attention: event-related brain potentials and performance." Psychophysiology **25**(5): 512-31.
- Kroemer, K. H. E. and E. Grandjean (1997). Fitting the task to the human : a textbook of occupational ergonomics. London ; Bristol, PA, Taylor & Francis.
- Laberge-Nadeau, C., U. Maag, et al. (2003). "Wireless telephones and the risk of road crashes." Accid Anal Prev **35**(5): 649-60.
- Laidlaw, D. H., M. Bilodeau, et al. (2000). "Steadiness is reduced and motor unit discharge is more variable in old adults." Muscle Nerve **23**(4): 600-12.
- Lal, S. K. and A. Craig (2001). "A critical review of the psychophysiology of driver fatigue." Biol Psychol **55**(3): 173-94.
- Lal, S. K. and A. Craig (2002). "Driver fatigue: electroencephalography and psychological assessment." Psychophysiology **39**(3): 313-21.
- Lamble, D., S. Rajalin, et al. (2002). "Mobile phone use while driving: Public opinions on restrictions." Transportation **29**(3): 223-236.
- Langford, J., S. Koppel, et al. (2008). "In defence of the 'low-mileage bias'." Accid Anal Prev **40**(6): 1996-9.
- Langford, J., R. Methorst, et al. (2006). "Older drivers do not have a high crash risk--a replication of low mileage bias." Accid Anal Prev **38**(3): 574-8.
- Lansdown, T. C., N. Brook-Carter, et al. (2004). "Distraction from multiple in-vehicle secondary tasks: vehicle performance and mental workload implications." Ergonomics **47**(1): 91-104.
- Latash, M. L. (2008). Neurophysiological basis of movement. Champaign, IL, Human Kinetics.
- Lee, D. N. (1976). "A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision." Perception **5**(4): 437-59.

- Lee, Y. C., J. D. Lee, et al. (2007). "Visual attention in driving: the effects of cognitive load and visual disruption." Hum Factors **49**(4): 721-33.
- Lee, Y. H. and B. S. Liu (2003). "Inflight workload assessment: comparison of subjective and physiological measurements." Aviat Space Environ Med **74**(10): 1078-84.
- Leibowitz, H. W. and S. Appelle (1969). "The effect of a central task on luminance thresholds for peripherally presented stimuli." Hum Factors **11**(4): 387-92.
- Levy, D. T., J. S. Vernick, et al. (1995). "Relationship between driver's license renewal policies and fatal crashes involving drivers 70 years or older." JAMA **274**(13): 1026-30.
- Li, G., E. R. Braver, et al. (2003). "Fragility versus excessive crash involvement as determinants of high death rates per vehicle-mile of travel among older drivers." Accid Anal Prev **35**(2): 227-35.
- Liu, A. (1998). What the driver's eye tells the car's brain. Eye Guidance in Reading and Scene Perception. G. Underwood, Oxford: Elsevier. **431-452**.
- Liu, B. S. and Y. H. Lee (2006). "In-vehicle workload assessment: effects of traffic situations and cellular telephone use." J Safety Res **37**(1): 99-105.
- Lobjois, R. and V. Cavallo (2007). "Age-related differences in street-crossing decisions: the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task." Accid Anal Prev **39**(5): 934-43.
- Lobjois, R. and V. Cavallo (2009). "The effects of aging on street-crossing behavior: from estimation to actual crossing." Accid Anal Prev **41**(2): 259-67.
- Lopez, I., V. Honrubia, et al. (1997). "Aging and the human vestibular nucleus." J Vestib Res **7**(1): 77-85.
- Luoma, J. (1984). "Perception and eye movements in simulated traffic situations." Acta Ophthalmol Suppl **161**: 128-34.
- Macworth, N. H. (1965). "Visual noise causes tunnel vision." Psycho Sci **3**: 67-68.
- Maltz, M. and D. Shinar (1999). "Eye movements of younger and older drivers." Hum Factors **41**(1): 15-25.
- Marottoli, R. A., H. Allore, et al. (2007). "A randomized trial of a physical conditioning program to enhance the driving performance of older persons." J Gen Intern Med **22**(5): 590-7.
- Marottoli, R. A., L. M. Cooney, Jr., et al. (1997). "Self-report versus state records for identifying crashes among older drivers." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **52**(3): M184-7.
- Marottoli, R. A., C. F. M. de Leon, et al. (2000). "Consequences of driving cessation: decreased out-of-home activity levels." J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci **55**(6): S334-40.
- Marottoli, R. A., P. H. Ness, et al. (2007). "A randomized trial of an education program to enhance older driver performance." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **62**(10): 1113-9.
- Marshall, S. C., K. G. Wilson, et al. (2007). "Measurement of driving patterns of older adults using data logging devices with and without global positioning system capability." Traffic Inj Prev **8**(3): 260-6.
- Martin, P. R., J. Todd, et al. (2005). "Effects of noise and a stressor on head pain." Headache **45**(10): 1353-64.
- Matheson, A. J., C. L. Darlington, et al. (1999). "Further evidence for age-related deficits in human postural function." J Vestib Res **9**(4): 261-4.

- Matthews, R., S. Legg, et al. (2003). "The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing." Accid Anal Prev **35**(4): 451-7.
- McCartt, A. T. and L. A. Hellinga (2007). "Longer-Term Effects of Washington, DC, Law on Drivers' Hand-Held Cell Phone Use." Traffic Inj Prev **8**(2): 199-204.
- McCartt, A. T., L. A. Hellinga, et al. (2006). "Cell phones and driving: review of research." Traffic Inj Prev **7**(2): 89-106.
- McCoy, P. T., M. S. Tarawneh, et al. (1993). "Evaluation of countermeasures for improving driving performance of older drivers." Transportation Research Board(1405): 72-80.
- McDonagh, M. J., M. J. White, et al. (1984). "Different effects of ageing on the mechanical properties of human arm and leg muscles." Gerontology **30**(1): 49-54.
- McGwin, G., Jr., C. Owsley, et al. (1998). "Identifying crash involvement among older drivers: agreement between self-report and state records." Accid Anal Prev **30**(6): 781-91.
- McKnight, A. J. and A. S. McKnight (1993). "The effect of cellular phone use upon driver attention." Accid Anal Prev **25**(3): 259-65.
- Meda, S. A., V. D. Calhoun, et al. (2008). "Alcohol dose effects on brain circuits during simulated driving: An fMRI study." Hum Brain Mapp.
- Michon, J. A. (1966). "Tapping regularity as a measure of perceptual motor load." Ergonomics **9**(5): 401-12.
- Mihal, W. L. and G. V. Barrett (1976). "Individual differences in perceptual information processing and their relation to automobile accident involvement." J Appl Psychol **61**(2): 229-33.
- Miltenburg, P. G. M. and M. J. H. Kuiken (1991). The Effect of Driving Experience on Visual Search Strategies. Result of a Laboratory Experiment. Feedback Requirements and Performance Differences of Drivers. M. J. Kuiken and J. A. Groeger, Haren, the Netherlands: Traffic Research Centre, University of Groningen.
- Miyake, S. (2001). "Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures." Int J Psychophysiol **40**(3): 233-8.
- Moran, J. and R. Desimone (1985). "Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex." Science **229**(4715): 782-4.
- Mourant, R. R. and T. H. Rockwell (1972). "Strategies of visual search by novice and experimental drivers." Hum Factors **14**(4): 325-35.
- Mulder, L. J. (1992). "Measurement and analysis methods of heart rate and respiration for use in applied environments." Biol Psychol **34**(2-3): 205-36.
- Myers, R. S., K. K. Ball, et al. (2000). "Relation of useful field of view and other screening tests to on-road driving performance." Percept Mot Skills **91**(1): 279-90.
- National Highway Traffic Safety Administration (1999). Older population. Traffic Safety Facts. Washington, DC.
- Neumann, D. L. (2002). "Effect of varying levels of mental workload on startle eyeblink modulation." Ergonomics **45**(8): 583-602.
- Nicoletta, J. (2000). Caractéristiques de conduite des jeunes et de la population vieillissante. Ottawa, Division des transports, Statistique Canada.
- Norman, D. A. (1968). "Toward a theory of memory and attention." Psychol Rev **75**: 522-36.
- Novack, T. A., J. H. Banos, et al. (2006). "UFOV performance and driving ability following traumatic brain injury." Brain Inj **20**(5): 455-61.

- Nunes, L. M. and M. A. Recarte (2002). "Cognitive demands of hands-free phone conversation while driving." Trans Res F **5**: 133-144.
- O'Donnell, R. D. and F. T. Eggemeier (1986). Workload assessment methodology. Handbook of perception and human performance. K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas. New York, Wiley.
- Ogden, G. D., J. M. Levine, et al. (1979). "Measurement of Workload by Secondary Tasks." Hum Factors **21**(5): 529-548.
- Olsen, E. C. B., S. E. Lee, et al. (2005). Eye glance during lane changes and straight-ahead driving. Transportation research board 2005. Washington.
- Olshansky, S. J., L. Hayflick, et al. (2002). "No truth to the fountain of youth." Sci Am **286**(6): 92-5.
- Otmani, S., T. Pebayle, et al. (2005). "Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers." Physiol Behav **84**(5): 715-24.
- Owsley, C. (1994). "Vision and driving in the elderly." Optom Vis Sci **71**(12): 727-35.
- Owsley, C., K. Ball, et al. (1998). "Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults." Jama **279**(14): 1083-8.
- Owsley, C., K. Burton-Danner, et al. (2000). "Aging and spatial localization during feature search." Gerontology **46**(6): 300-5.
- Owsley, C. and G. McGwin, Jr. (1999). "Vision impairment and driving." Surv Ophthalmol **43**(6): 535-50.
- Owsley, C., G. McGwin, Jr., et al. (2004). "Impact of an educational program on the safety of high-risk, visually impaired, older drivers." Am J Prev Med **26**(3): 222-9.
- Panek, P. E., G. V. Barrett, et al. (1977). "A review of age changes in perceptual information processing ability with regard to driving." Exp Aging Res **3**(4-6): 387-449.
- Parasuraman, R., R. Molloy, et al. (1993). "Performance consequences of automation-induced "complacency"." Int J Aviat Psychol **3**: 1-13.
- Park, J. J., Y. Tang, et al. (2001). "Age-related change in the number of neurons in the human vestibular ganglion." J Comp Neurol **431**(4): 437-43.
- Patomella, A. H., A. Kottorp, et al. (2008). "Awareness of driving disability in people with stroke tested in a simulator." Scand J Occup Ther: 1-9.
- Patten, C. J., A. Kircher, et al. (2004). "Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation." Accid Anal Prev **36**(3): 341-50.
- Perret, E. and F. Regli (1970). "Age and the perceptual threshold for vibratory stimuli." Eur Neurol **4**(2): 65-76.
- Petrella, R. J., P. J. Lattanzio, et al. (1997). "Effect of age and activity on knee joint proprioception." Am J Phys Med Rehabil **76**(3): 235-41.
- Ponder, E. and W. P. Kennedy (1927). "On the act of blinking." Q J Exp Physiol(18): 89-110.
- Ponds, R. W., W. H. Brouwer, et al. (1988). "Age differences in divided attention in a simulated driving task." J Gerontol **43**(6): P151-6.
- Porter, M. M. and M. J. Whitton (2002). "Assessment of driving with the global positioning system and video technology in young, middle-aged, and older drivers." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **57**(9): M578-82.
- Poysti, L., S. Rajalin, et al. (2005). "Factors influencing the use of cellular (mobile) phone during driving and hazards while using it." Accid Anal Prev **37**(1): 47-51.

- Rahimi, M., R. P. Briggs, et al. (1990). "A field evaluation of driver eye and head movement strategies toward environmental targets and distractors." Appl Ergon **21**(4): 267-74.
- Recarte, M. A. and L. M. Nunes (2000). "Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving." J Exp Psychol Appl **6**(1): 31-43.
- Recarte, M. A. and L. M. Nunes (2003). "Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making." J Exp Psychol Appl **9**(2): 119-37.
- Redelmeier, D. A. and R. J. Tibshirani (1997). "Association between cellular-telephone calls and motor vehicle collisions." N Engl J Med **336**(7): 453-8.
- Reimer, B. and M. Sodhi (2006). "Detecting eye movements in dynamic environments." Behav Res Methods **38**(4): 667-82.
- Rigal, R. (1995). Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques. Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec.
- Rigal, R. (2002). Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques. Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec.
- Rizzo, M., S. Reinach, et al. (1997). "Simulated car crashes and crash predictors in drivers with Alzheimer disease." Arch Neurol **54**(5): 545-51.
- Roenker, D. L., G. M. Cissell, et al. (2003). "Speed-of-processing and driving simulator training result in improved driving performance." Hum Factors **45**(2): 218-33.
- Roos, M. R., C. L. Rice, et al. (1997). "Age-related changes in motor unit function." Muscle Nerve **20**(6): 679-90.
- Roscoe, A. H. (1978). "Stress and workload in pilots." Aviat Space Environ Med **49**(4): 630-3.
- Roscoe, A. H. (1992). "Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration?" Biol Psychol **34**(2-3): 259-87.
- Roscoe, A. H. (1993). "Heart rate as a psychophysiological measure for in-flight workload assessment." Ergonomics **36**(9): 1055-62.
- Rosenhall, U. and W. Rubin (1975). "Degenerative changes in the human vestibular sensory epithelia." Acta Otolaryngol **79**(1-2): 67-80.
- Rubin, G. S., E. S. Ng, et al. (2007). "A prospective, population-based study of the role of visual impairment in motor vehicle crashes among older drivers: the SEE study." Invest Ophthalmol Vis Sci **48**(4): 1483-91.
- Rubin, G. S., K. B. Roche, et al. (1994). "Visual impairment and disability in older adults." Optom Vis Sci **71**(12): 750-60.
- Ryan, G. A., M. Legge, et al. (1998). "Age related changes in drivers' crash risk and crash type." Accid Anal Prev **30**(3): 379-87.
- Salthouse, T. A. (1979). "Adult age and the speed-accuracy trade-off." Ergonomics **22**(7): 811-21.
- Sanders, A. F. (1993). Processing information in the functional visual field. Perception and Cognition. G. D'Ydelwalle and J. Van Rensbergen. Amsterdam, Elsevier.
- Sarna, S., T. Sahi, et al. (1993). "Increased life expectancy of world class male athletes." Med Sci Sports Exerc **25**(2): 237-44.
- Schieber, F. (1989). The complex visual reaction time test. Unpublished manuscript. Oakland, Department of psychology, Oakland University
- Schlag, B. (1993). "Elderly drivers in Germany--fitness and driving behavior." Accid Anal Prev **25**(1): 47-55.

- Schmidt, R. A. (1975). "A shema theory of discrete motor skill learning." Psychol Rev **82**: 225-260.
- Schmidt, R. A. and T. D. Lee (1999). Motor control and learning : a behavioral emphasis. Champaign, IL, Human Kinetics.
- Scialfa, C. T., S. P. Esau, et al. (1998). "Age, target-distractor similarity, and visual search." Exp Aging Res **24**(4): 337-58.
- Scott, J. J. and R. Gray (2008). "A comparison of tactile, visual, and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving." Hum Factors **50**(2): 264-75.
- Sekiguchi, C., Y. Handa, et al. (1978). "Evaluation method of mental workload under flight conditions." Aviat Space Environ Med **49**(7): 920-5.
- Sekuler, R. and K. Ball (1986). "Visual localization: age and practice." J Opt Soc Am A **3**(6): 864-7.
- Sekuler, R. and R. Blake (1994). Perception. New-York, McGraw-Hill.
- Seppelt, B. and C. D. Wickens (2003). In-Vehicle Tasks: Effects of Modality, Driving Relevance, and Redundancy. Savoy, Illinois, Aviation Human Factors Division Institute of Aviation.
- Shinar, D., E. D. McDowell, et al. (1978). "Field dependence and driver visual search behavior." Hum Factors **20**(5): 553-9.
- Shinar, D., N. Tractinsky, et al. (2005). "Effects of practice, age, and task demands, on interference from a phone task while driving." Accid Anal Prev **37**(2): 315-26.
- Sirevaag, E. J., A. F. Kramer, et al. (1993). "Assessment of pilot performance and mental workload in rotary wing aircraft." Ergonomics **36**(9): 1121-40.
- Skinner, H. B., R. L. Barrack, et al. (1984). "Age-related decline in proprioception." Clin Orthop Relat Res(184): 208-11.
- Société de l'Assurance Automobile du Québec (1999). Guide de l'évaluation médicale et optométrique des conducteurs du Québec.
- Sodhi, M., B. Reimer, et al. (2002). "Glance analysis of driver eye movements to evaluate distraction." Behav Res Methods Instrum Comput **34**(4): 529-38.
- Spiegel, K. M., J. Stratton, et al. (1996). "The influence of age on the assessment of motor unit activation in a human hand muscle." Exp Physiol **81**(5): 805-19.
- Spirduo, W. W., K. L. Francis, et al. (2005). Physical dimensions of aging. Champaign, IL, Human Kinetics.
- Staplin, L., K. W. Gish, et al. (2008). "'Low mileage bias' and related policy implications--a cautionary note." Accid Anal Prev **40**(3): 1249-52.
- Statistique Canada (1999). Tendances sociales canadiennes. Le Quotidien.
- Statistique Canada (2005). Projections démographiques. Le Quotidien.
- Statistique Canada (2006). Annuaire du Canada.
- Statistique Canada (2006). Enquête sur le service téléphonique résidentiel. Le Quotidien.
- Statistiques Canada (2006). La population canadienne selon l'âge et le sexe. Le Quotidien.
- Stelmach, G. E., N. L. Goggin, et al. (1988). "Aging and the restructuring of precued movements." Psychol Aging **3**(2): 151-7.
- Stelmach, G. E., N. Teasdale, et al. (1989). "Age related decline in postural control mechanisms." Int J Aging Hum Dev **29**(3): 205-23.
- Serman, M. B. and C. A. Mann (1995). "Concepts and applications of EEG analysis in aviation performance evaluation." Biol Psychol **40**(1-2): 115-30.
- Stern, J. A., D. Boyer, et al. (1994). "Blink rate: a possible measure of fatigue." Hum Factors **36**(2): 285-97.

- Stern, J. A., L. C. Walrath, et al. (1984). "The endogenous eyeblink." Psychophysiology **21**(1): 22-33.
- Stevens, J. C. (1992). "Aging and spatial acuity of touch." J Gerontol **47**(1): P35-40.
- Strayer, D. L., F. A. Drews, et al. (2006). "A comparison of the cell phone driver and the drunk driver." Hum Factors **48**(2): 381-91.
- Strayer, D. L., F. A. Drews, et al. (2003). "Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving." J Exp Psychol Appl **9**(1): 23-32.
- Strayer, D. L. and W. A. Johnston (2001). "Driven to distraction: dual-Task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone." Psychol Sci **12**(6): 462-6.
- Sullman, M. J. and P. H. Baas (2004). "Mobile phone use amongst New Zealand drivers." Trans Res F **7**(2): 95-105.
- Svensson, E., M. Angelborg-Thanderz, et al. (1997). "Information complexity--mental workload and performance in combat aircraft." Ergonomics **40**(3): 362-80.
- Tang, P. F., M. H. Woollacott, et al. (1998). "Control of reactive balance adjustments in perturbed human walking: roles of proximal and distal postural muscle activity." Exp Brain Res **119**(2): 141-52.
- Teasdale, N., V. Cantin, et al. (2004). "Attentional demands while driving in a simulator: Effects of driving straights on open roads and when approaching an intersection." Advances in Transportation Studies: An International Journal(Special): 29-38.
- Teasdale, N., M. Lavallières, et al. (2007). Visual inspections made by young and elderly drivers before lane changing. International Conference on Road Safety and Simulation, Rome.
- Thornbury, J. M. and C. M. Mistretta (1981). "Tactile sensitivity as a function of age." J Gerontol **36**(1): 34-9.
- Thulin, H. and S. Gustafsson (2004). Mobile Phone Use while driving. VTI rapport 490A, Swedish National Road Administration: 36.
- Ting, P. H., J. R. Hwang, et al. (2008). "Driver fatigue and highway driving: a simulator study." Physiol Behav **94**(3): 448-53.
- Tornros, J. E. and A. K. Bolling (2005). "Mobile phone use-effects of handheld and handsfree phones on driving performance." Accid Anal Prev **37**(5): 902-9.
- Treffner, P. and R. Barrett (2004). "Hands-free mobile phone speech while driving degrades coordination and control." Trans Res F **7**: 229-246.
- Treffner, P., R. Barrett, et al. (2002). "Stability and skill in driving." Hum Mov Sci **21**(5-6): 749-84.
- Treisman, A. M. (1969). "Strategies and models of selective attention." Psychol Rev **76**(3): 282-99.
- Tsai, Y. F., E. Viirre, et al. (2007). "Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload." Aviat Space Environ Med **78**(5 Suppl): B176-85.
- Tuokko, H. A., P. McGee, et al. (2007). "Perception, attitudes and beliefs, and openness to change: implications for older driver education." Accid Anal Prev **39**(4): 812-7.
- U.S. Department of Transportation (1997). Improving Transportation for a Maturing Society. Washington, DC.
- Underwood, G. (2007). "Visual attention and the transition from novice to advanced driver." Ergonomics **50**(8): 1235-49.
- Underwood, G., P. Chapman, et al. (2003). "Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers." Ergonomics **46**(6): 629-46.

- Underwood, G., D. Crundall, et al. (2002). "Selective searching while driving: the role of experience in hazard detection and general surveillance." Ergonomics **45**(1): 1-12.
- Underwood, G., N. Phelps, et al. (2005). "Eye fixation scanpaths of younger and older drivers in a hazard perception task." Ophthalmic Physiol Opt **25**(4): 346-56.
- Veltman, J. A. and A. W. Gaillard (1996). "Physiological indices of workload in a simulated flight task." Biol Psychol **42**(3): 323-42.
- Veltman, J. A. and A. W. Gaillard (1998). "Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty." Ergonomics **41**(5): 656-69.
- Verwey, W. B. (1993). How can we prevent overload of the driver? Driving Future Vehicles. A. M. P. a. S. Franzen. London, Taylor and Francis: 235-244.
- Vidulich, M. A. and P. S. Tsang (2007). "Methodological and theoretical concerns in multitask performance: a critique of Boles, Bursk, Phillips, and Perdelwitz." Hum Factors **49**(1): 46-9; discussion 50-2.
- Vingrys, A. J. and B. L. Cole (1988). "Are colour vision standards justified for the transport industry?" Ophthalmic Physiol Opt **8**(3): 257-74.
- Volkman, F. C. (1986). "Human visual suppression." Vision Res **26**(9): 1401-16.
- Volkman, F. C., L. A. Riggs, et al. (1980). "Eyeblinks and visual suppression." Science **207**(4433): 900-2.
- Waller, J. A. (1992). "Research and other issues concerning effects of medical conditions on elderly drivers." Hum Factors **34**(1): 3-15; discussion 17-24.
- Waller, P. F. (1991). "The older driver." Hum Factors **33**(5): 499-505.
- Waller, P. F., H. E.G., et al. (1977). An Analysis of Accidents by Age. 56th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- Wang, J.-S., R. R. Knippling, et al. (1996). The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 Crashworthiness Data System. 40th Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine.
- Wang, S. C. (2001). "An Aging Population: Fragile, Handle With Care." Retrieved 9 août 2007.
- Welford, A. T., A. H. Norris, et al. (1969). "Speed and accuracy of movement and their changes with age." Acta Psychol (Amst) **30**: 3-15.
- West, C. G., G. Gildengorin, et al. (2003). "Vision and driving self-restriction in older adults." J Am Geriatr Soc **51**(10): 1348-55.
- Wickens, C. D. (1976). "The effects of divided attention on information processing in manual tracking." J Exp Psychol Hum Percept Perform **2**(1): 1-13.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. Varieties of Attention. R. Parasuraman and D. R. Davis. New-York, Academic Press.
- Wickens, C. D. (2007). "How many resources and how to identify them? Commentary on Boles et al. and Vidulich and Tsang." Hum Factors **49**(1): 53-6.
- Wickens, C. D. and J. G. Hollands (2000). Engineering Psychology and Human Performance (3rd ed.). Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Wientjes, C. J. (1992). "Respiration in psychophysiology: methods and applications." Biol Psychol **34**(2-3): 179-203.
- Wierwille, W. W. (1979). "Physiological measures of aircrew mental workload." Hum Factors **21**(5): 575-93.
- Wierwille, W. W. (1993). Visual and manual demands of in-car controls and displays. Automotive Ergonomics. B. Peacock and Karwowski. London, Taylor and Francis.

- Wikman, A. S. and H. Summala (2005). "Aging and time-sharing in highway driving." Optom Vis Sci **82**(8): 716-23.
- Williams, L. J. (1982). "Cognitive load and the functional field of view." Hum Factors **24**(6): 683-92.
- Wilson, G. F. (1993). "Air-to-ground training missions: a psychophysiological workload analysis." Ergonomics **36**(9): 1071-87.
- Windsor, T. D., K. J. Anstey, et al. (2008). "Ability perceptions, perceived control, and risk avoidance among male and female older drivers." J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci **63**(2): P75-83.
- Winegard, K. J., A. L. Hicks, et al. (1997). "An evaluation of the length-tension relationship in elderly human plantarflexor muscles." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **52**(6): B337-43.
- Wolfe, J. M. and T. S. Horowitz (2004). "What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it?" Nat Rev Neurosci **5**(6): 495-501.
- Wood, J. M. (1999). "How do visual status and age impact on driving performance as measured on a closed circuit driving track?" Ophthalmic Physiol Opt **19**(1): 34-40.
- Wood, J. M. and T. P. Carberry (2006). "Bilateral cataract surgery and driving performance." Br J Ophthalmol **90**(10): 1277-80.
- Wood, J. M. and K. Mallon (2001). "Comparison of driving performance of young and old drivers (with and without visual impairment) measured during in-traffic conditions." Optom Vis Sci **78**(5): 343-9.
- Wood, J. M. and R. Troutbeck (1992). "Effect of restriction of the binocular visual field on driving performance." Ophthalmic Physiol Opt **12**(3): 291-8.
- Wood, J. M. and R. Troutbeck (1994). "Effect of visual impairment on driving." Hum Factors **36**(3): 476-87.
- Wood, J. M. and R. Troutbeck (1995). "Elderly drivers and simulated visual impairment." Optom Vis Sci **72**(2): 115-24.
- Wood, J. M., K. Wick, et al. (1998). "The effect of monovision contact lens wear on driving performance." Clin Exp Optom **81**(3): 100-103.
- Yan, J. H., J. R. Thomas, et al. (1998). "Aging and rapid aiming arm movement control." Exp Aging Res **24**(2): 155-68.
- Zeier, H. (1979). "Concurrent physiological activity of driver and passenger when driving with and without automatic transmission in heavy city traffic." Ergonomics **22**(7): 799-810.
- Zimmerman, S. D., R. J. McCormick, et al. (1993). "Age and training alter collagen characteristics in fast- and slow-twitch rat limb muscle." J Appl Physiol **75**(4): 1670-4.