



ASPAM

Ageing & SPAtial Memory

Vieillessement & Mémoire spatiale : évaluation et compensation des déficits en
conduite automobile

Rapport final

André Dufour & Olivier Després

1^{er} semestre 2014



SOMMAIRE

1. RESUME.....	5
2. COORDINATEUR DE L'ETUDE.....	7
3. PARTENAIRES	7
4. PUBLICATION DE L'ETUDE.....	7
5. ELEMENTS FINANCIERS	7
6. CONTEXTE THEORIQUE	8
6.1. LES SENIORS ET LA SECURITE ROUTIERE.....	8
6.2. DES DEFICITS IDENTIFIES CHEZ LES SENIORS	9
6.3. LA MEMOIRE SPATIALE EN CAUSE	10
7. HYPOTHESE	14
8. ETUDE I.....	16
8.1. METHODOLOGIE	16
8.1.1. <i>Participants</i> :	16
8.1.2. <i>Évaluations Neuropsychologiques</i> :	18
8.1.2.1. Bilan neuropsychologique de base :	18
8.1.2.2. Évaluation neuropsychologique des capacités en lien avec la conduite automobile :	19
8.1.3. <i>Évaluation des déficits spatiaux en conduite automobile</i>	21
8.1.3.1. Tâche de mémorisation de trajet sur le simulateur de conduite	21
8.1.3.2. Épreuves d'évaluation de la mémoire spatiale	22
8.2. RESULTATS.....	24
8.2.1. <i>Analyse des données obtenues sur simulateur</i>	24

8.2.1.1.	Taux de réussite et d'échec à la phase de test.....	24
8.2.1.2.	Analyses des paramètres de conduite	26
8.2.2.	<i>Analyses des scores aux épreuves d'évaluation de la mémoire spatiale</i>	<i>29</i>
8.2.3.	<i>Analyses corrélationnelles entre les scores aux tests neuropsychologiques et les performances au test de conduite simulée</i>	<i>31</i>
9.	ETUDE II.....	34
9.1.	METHODOLOGIE	35
9.1.1.	<i>Participants :</i>	<i>35</i>
9.1.2.	<i>Évaluation du système de mémorisation préalable du parcours.....</i>	<i>35</i>
9.2.	RESULTATS.....	38
9.2.1.	<i>Taux de réussite à la réalisation du parcours</i>	<i>38</i>
9.2.2.	<i>Analyses des paramètres de conduite</i>	<i>39</i>
10.	CONCLUSION	41
11.	BIBLIOGRAPHIE	44

1. Résumé

Afin de nous repérer dans notre environnement, nous nous construisons des cartes spatiales cognitives. Pour élaborer ces cartes, nous disposons de deux stratégies pour repérer les éléments qui nous entourent. D'une part, nous pouvons encoder ces éléments par rapport à notre propre position: cette stratégie est dite "égocentrique". D'autre part, une stratégie plus complexe, dite "allocentrique", consiste à repérer les éléments environnementaux les uns par rapport aux autres. Les capacités à se repérer dans l'espace s'altèrent avec l'âge. Ce déficit semble relever d'une diminution des capacités d'encodage allocentrique avec le vieillissement, alors que les traitements égocentriques semblent préservés. L'hypothèse principale de notre étude était que l'altération du traitement spatial qui est communément observée au cours du vieillissement, a pour conséquence chez les conducteurs seniors, une mobilisation importante de leurs ressources cognitives lorsqu'ils évoluent dans un environnement non familier. Cette mobilisation accrue de ressources pour le traitement spatial se ferait au détriment d'autres fonctions cognitives sollicitées lors de la conduite automobile. Or, plusieurs études récentes indiquent que les difficultés de mémorisation des personnes âgées peuvent être palliées par l'application de stratégies cognitives. Nous avons abordé cette problématique, en répondant aux deux questions suivantes :

1. Peut-on faciliter la mémorisation spatiale d'un conducteur senior en lui proposant une stratégie cognitive pour encoder spatialement son environnement ?
2. Si une telle stratégie est efficace sur les performances mnésiques, a-t-elle également un impact sur la conduite automobile ?

A cette fin, nous avons évalué les performances de conduite de sujets jeunes et de seniors lors d'une tâche de mémorisation d'un trajet en conduite automobile simulée dans une ville virtuelle. Les résultats confirment que les conducteurs seniors ont plus de difficultés que les jeunes automobilistes à mémoriser leur environnement routier. Cependant, lorsqu'il est

explicitement demandé à ces conducteurs séniors de porter leur attention sur les éléments jalonnant leur parcours, leurs performances de mémorisation sont équivalentes à celles des sujets jeunes. De plus, les données indiquent que cette amélioration de la mémorisation spatiale par une consigne explicite d'encodage est associée à une amélioration des performances de conduite des automobilistes séniors (vitesse, souplesse de la conduite).

2. Coordinateur de l'étude



Centre d'Investigations Neurocognitives et Neurophysiologiques
UMS 3489 (CNRS / Université de Strasbourg)
21 rue Becquerel, 67087, Strasbourg.

3. Partenaires



Renault Guyancourt
78280, Guyancourt.

Responsable du projet : Michèle MOESSINGER



Centre de réadaptation de Mulhouse
57, rue Albert Camus 68093 Mulhouse
Responsable du projet : Laurence BILZ

4. Publication de l'étude

Lithfous, S., Dufour, A., Moessinger, M., Bilz, L., Sundby, C. & Després, O. (In Press). Appropriate encoding strategies compensate for driving abilities in elderly individuals: a virtual reality study. *Journal of the American Geriatrics Society*.

5. Éléments financiers

Financier : MEEDDM-DRI
Coût total du projet : 385 387 €
Total du financement : 258 183 €
Date de fin du projet : 01/2014

6. Contexte théorique

6.1. Les séniors et la sécurité routière

De récentes analyses projectives sur la démographie européenne (Robert-Bobée, 2007) indiquent que la population française devrait atteindre en 2050 près de 70 millions d'habitants. Un tiers de cette population sera âgé de plus de 60 ans, alors qu'actuellement ce ratio est de 1/5. Ce vieillissement de la population est moins marqué que pour la plupart des autres pays européens, mais l'impact sur le plan social et économique sera considérable. En effet, dans cette problématique, un facteur non négligeable est la baisse de la natalité qui, réduisant le nombre des actifs, va inévitablement réduire les ressources disponibles notamment pour la prise en charge des individus âgés. L'objectif est donc de garder cette population active le plus longtemps possible et surtout de favoriser l'indépendance de l'individu. La population actuelle est caractérisée par son hétérogénéité. Les années à venir pourraient voir émerger de l'ensemble de cette population, une fraction plus importante de personnes saines et actives, présentant les altérations normales du vieillissement, mais qui continueront à exercer une activité professionnelle et seront toujours aptes à la conduite. Ces personnes auront la capacité d'assumer une voiture et revendiqueront aux mêmes titres que les plus jeunes le droit de la conduire (OCDE, 2001). En 1990, les plus de 65 ans représentaient moins de 13% des usagers de la route, alors que ce taux atteignait plus de 18% en 2000. Il convient aujourd'hui de prendre en considération les spécificités des conducteurs âgés pour la gestion du trafic et de la sécurité routière. Les conducteurs séniors présentent des comportements et des habitudes de conduite qui diffèrent de celles des conducteurs plus jeunes (Fontaine et al., 2003). L'accidentologie des conducteurs âgés présente également des singularités (Fontaine et Gourlet, 1991). Contrairement aux conducteurs très jeunes, les séniors impliqués dans des accidents de la route sont souvent seuls à bord de leur véhicule et présentent un taux d'alcoolémie sous le seuil de

l'illégalité (Biecheler et al., 1997). Ils commettent plutôt des erreurs de conduite que des violations du code de la route, ces dernières étant rarement réalisées volontairement. D'une manière générale, les accidents de la route dont sont victimes les conducteurs âgés ont lieu lors de trajets diurnes (Eberhard, 1996), hors du département de résidence (Fontaine, 2003), à des intersections ou lors de manœuvres de changement de direction (Van Elsande, 2003). Le taux d'accident pour les personnes âgées augmente considérablement avec la distance du trajet effectué (Guerrier et al., 1999 ; Lyman et al., 2002 ; Preusser et al., 1988). Cependant, les conducteurs âgés ne représentent pas un risque augmenté de sinistralité routière pour les autres usagers. Au contraire, cette population, de part sa plus grande fragilité physique lors d'un choc, paie un lourd tribut à la mortalité routière (Fontaine, 2003 ; Li et al., 2003 ; McGwin et al., 2000).

6.2. Des déficits identifiés chez les séniors

Plusieurs études ont permis d'identifier des facteurs physiques, sensoriels et cognitifs associés aux difficultés que peuvent rencontrer des personnes âgées en conduite automobile. L'abaissement de l'acuité visuelle, ainsi que la diminution du champ visuel au cours du vieillissement sont les principaux facteurs sensoriels conduisant à une diminution des compétences en conduite automobile (Kotecha et al., 2008 pour revue). Cependant, si les altérations physiques et sensorielles jouent un rôle important dans l'altération des habiletés de conduite chez les séniors, les difficultés des personnes âgées à évoluer dans le trafic routier résultent principalement de la dégradation de fonctions cognitives (Marmeleira et al., 2009). À partir d'une méta-analyse de treize études empiriques, Anstey et al. (2005) ont étudié le lien entre différentes fonctions cognitives et des mesures de performance de conduite chez des personnes âgées. Ces auteurs concluent que les performances attentionnelles, mnésiques, exécutives et visuo-spatiales sont étroitement liées à l'efficacité des habiletés de conduite sur route des séniors. Il est important de noter cependant que les performances mnésiques

évaluées dans la plupart des études sont celles des mémoires de travail et à court terme, très dépendantes du fonctionnement frontal. Peu d'auteurs ont étudié les liens entre mémoire à long terme et performances de conduite chez les personnes âgées. D'une manière générale, le déclin de certaines fonctions exécutives au cours du vieillissement semble expliquer, en partie, les difficultés que rencontrent les conducteurs âgés. Les altérations incluent la diminution de la vitesse du traitement de l'information et de la flexibilité cognitive, des troubles de l'inhibition, une détérioration des ressources attentionnelles, des troubles de la planification et de la mise en place de stratégies cognitives, ainsi qu'une dégradation de l'efficacité de la mémoire de travail (Ball et al., 2004 ; Spirduso et al., 2005). Le déclin des fonctions exécutives semble corrélé aux modifications structurales que subit le cerveau humain au cours du vieillissement non-pathologique. En effet, elles sont sous-tendues par les structures préfrontales, qui sont les zones neuroanatomiques dont l'atrophie est la plus précoce (dès l'âge de 30 ans - Raz et al., 2004). L'altération des fonctions frontales pourrait être à l'origine d'un certain nombre de difficultés objectivées chez les conducteurs âgés tels que l'évaluation des distances, le traitement de plusieurs informations routières simultanément, l'attention soutenue lors d'un long trajet, la réaction rapide et adaptée dans une situation d'urgence ou encore, l'interprétation correcte des signaux du trafic routier (Reger et al., 2004). Cependant, les fonctions exécutives associées aux structures frontales ne sont pas les seules habiletés cognitives déclinant avec l'âge.

6.3. La mémoire spatiale en cause

Plusieurs études neuroanatomiques ou en neuroimagerie fonctionnelle montrent que l'hippocampe est le siège de modifications structurales et neurochimiques au cours du vieillissement nonpathologique (e.g., Tohno et al., sous presse ; Ystad et al., 2009 ; Woollett and Maguire, 2009 ; Raz et al., 2004). Or, cette structure est particulièrement sollicitée lors de tâches de mémoire épisodique (Shapiro et al., 2006). La mémoire épisodique est par définition le système mnésique permettant l'encodage, le stockage et la récupération d'événements

personnels dans leur contexte spatial et temporel d'acquisition (Tulving, 2002). Ce système permet d'associer un événement spécifique (e.g., un accident de la route) au contexte spatio-temporel (i.e., dans quelle rue et à quel moment du trajet) dans lequel cet événement a eu lieu. Cette mémoire est particulièrement sensible aux effets du vieillissement, la diminution de son efficacité étant liée à l'atrophie des structures temporales médianes, incluant l'hippocampe (e.g., Mormino et al., 2009). Par contre, la mémoire sémantique, qui est impliquée dans le traitement des connaissances factuelles et qui ne nécessite pas le rappel du contexte spatio-temporel d'acquisition, semble préservée au cours du vieillissement normal (Chalfonte et Johnson, 1996). Ainsi, les personnes âgées sont capables de décrire un événement dans sa composante sémantique (i.e., le « quoi »), tout en éprouvant des difficultés à préciser le contexte spatio-temporel de cet événement (i.e., le « où » et le « quand » - Naveh-Benjamin, 1990). Ce déficit de la mémoire épisodique se caractérise plus précisément par une altération de la mémoire spatiale (système de la mémoire épisodique) chez les personnes âgées (Moffat et al., 2001). Or l'impact du déclin de cette fonction sur les capacités de conduite des séniors n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée. Pourtant, la mémoire spatiale joue un rôle prépondérant lors de nos déplacements, notamment sur route, lorsque nous effectuons un trajet dans un environnement nouveau.

Une mémoire spatiale déficitaire peut relever d'un encodage altéré, d'une consolidation de l'information déficiente, ou encore d'un trouble de la récupération (Aguirre et D'Esposito, 1999). De nombreuses études semblent indiquer que les difficultés de mémorisation spatiale observées lors d'un vieillissement non-pathologique, relèvent essentiellement d'un problème d'encodage, pouvant s'expliquer par deux facteurs : d'une part l'accroissement lié à l'âge de l'influence de la charge cognitive sur les processus d'encodage (Holtzer et al., 2009), et d'autre part une altération de l'hippocampe au cours du vieillissement qui perturbe l'ensemble des processus mnésiques (Antonova et al., 2009). L'encodage des informations spatiales a un rôle primordial

pour permettre à tout un chacun de se repérer rapidement dans un environnement nouveau et à s'adapter à tout changement de cet environnement (Burgess, 2006). Cet encodage peut être réalisé à partir (i) du traitement spatial des items environnementaux perçus, (ii) de représentations symboliques (i.e., telle une carte routière) ou (iii) d'informations langagière (i.e., description verbale d'un itinéraire – Taylor et Rapp, 2006). Les troubles de la mémoire spatiale chez les personnes âgées résulteraient essentiellement d'un déficit d'encodage spatial des items environnementaux (Cushman et al., 2008 ; Moffat et al., 2006). L'encodage spatial permet d'élaborer une représentation mentale de l'environnement sous la forme d'une carte cognitive, dans laquelle sont intégrés les items perçus lors de l'exploration de cet environnement. La précision de la localisation des items au sein de cette carte cognitive dépend de la qualité de l'encodage, qualité qui est elle-même tributaire notamment des ressources cognitives qui sont allouées à ce processus. Or, au cours du vieillissement normal, l'allocation de ressources cognitives semble perturbée (Holtzer et al., 2009). De plus, un déficit, lié à l'âge, du maintien des informations en mémoire de travail visuo-spatiale serait plus prononcé lorsque la charge cognitive de la tâche augmente (Kessels et al., 2010). Ces déficits résulteraient notamment d'une sollicitation accrue des structures frontales chez les personnes âgées, notamment pour l'encodage épisodique (i.e., et plus spécifiquement des informations spatiales), normalement associé à l'activité des structures temporales médianes (Gutchess, 2005). L'encodage spatial étant fortement perturbé lors de l'augmentation de la charge cognitive chez les personnes âgées, la constitution d'une carte cognitive lors de l'exploration d'un environnement nouveau semble plus laborieuse chez les personnes âgées que chez les adultes jeunes (Moffat et al., 2006), notamment lorsque le nombre de tâches cognitives exécutées simultanément augmente. Pour établir une telle carte cognitive, les localisations spatiales des items environnementaux saillants sont mémorisées selon un codage égocentrique (Burgess, 2006 pour revue), c'est-à-dire en fonction de leur localisation par rapport à la position de l'observateur (i.e., à sa gauche, face

à lui ou à sa droite). Ces codages égocentriques sont assurés par un réseau pariétal postérieur et frontal (Gramann et al., 2006). Les données égocentrées sont intégrées au fur et à mesure de l'exploration spatiale dans une carte spatiale cognitive qui permet d'établir des relations allocentrées entre les différents items encodés (Burgess, 2006 pour revue). Cette représentation allocentrée, dont l'établissement dépend essentiellement des structures temporelles médianes de l'hémisphère droit (Moffat et al., 2006 – Figure 1), permet d'établir les relations spatiales entre les items les uns par rapport aux autres, indépendamment de la position de l'observateur. Lorsque cette carte cognitive établie est suffisamment efficace, la charge cognitive affectée à l'exploration de l'environnement diminue et une partie des ressources jusque-là réservée à l'exploration spatiale, peut être affectée à d'autres fonctions cognitives. Or, l'efficacité des processus permettant l'élaboration d'une représentation allocentrée diminue au cours du vieillissement (Moffat et al., 2007). Cette altération a pour conséquence d'accroître, chez les personnes âgées, l'effort cognitif et la durée nécessaire pour établir une carte spatiale. Cet effort accru pourrait ainsi affecter l'efficacité d'autres fonctions cognitives (essentiellement exécutives) affectées à la gestion du trafic et à l'interprétation des signaux routiers. Cette hypothèse est concordante avec les données statistiques qui indiquent que les conducteurs âgés ont principalement des accidents sur des trajets réalisés avec une faible fréquence, généralement hors de leur département d'habitation (i.e., un environnement spatial jusque-là peu exploré, voire nouveau). Les accidents des conducteurs plus jeunes sont, en revanche, souvent occasionnés sur des trajets empruntés quotidiennement, données caractéristiques des classes actives (Fontaine 2003). Cette difficulté à la conduite sur des trajets nouveaux est rapportée par les personnes âgées, qui se rendent compte de la survenue de déficits d'exploration spatiale. Cette prise de conscience des seniors induit le développement de comportements d'évitement de trajets et de lieux non familiers lors de déplacement en conduite automobile (Burns, 1999).

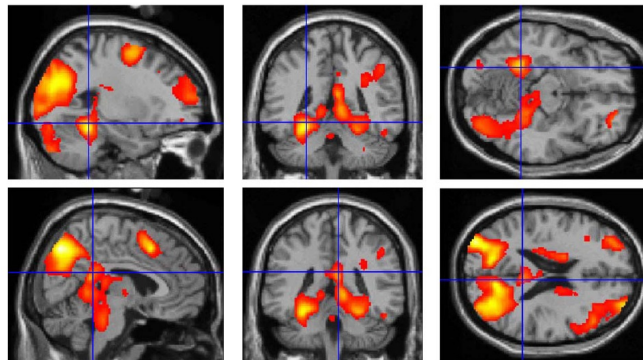


Figure 1 : Structures cérébrales sollicitées lors d'une tâche de navigation spatiale nécessitant l'utilisation d'une carte cognitive chez des sujets jeunes (N = 30 ; 27,07 ans en moyenne). L'augmentation de l'activité cérébrale est observée au niveau des structures temporales médianes (hippocampe et gyrus parahippocampique), ainsi qu'au niveau d'un large réseau occipito-pariétal. Chez les sujets âgés, lors d'une même tâche, le réseau sollicité est essentiellement frontal. (D'après Moffat et al., 2006)

7. Hypothèse

L'hypothèse principale de notre étude était que l'altération du traitement spatial allocentrique au cours du vieillissement se traduit par une difficulté à mémoriser les trajets dans des environnements nouveaux. Ce trouble de la mémoire spatiale aurait pour conséquence une mobilisation importante des ressources cognitives (i.e. attentionnelles), au détriment d'autres fonctions, telles que les fonctions exécutives, nécessaires pour la planification et la gestion efficace de l'ensemble de nos actions lors de la conduite automobile.

L'objectif premier de cette étude était de caractériser le déficit de mémoire spatiale chez les personnes âgées. Notre hypothèse principale était que les déficits de mémorisation spatiale observés lors du vieillissement relèvent d'un trouble de l'encodage, en raison de ressources cognitives insuffisantes allouées à cette fonction. Dans ce but, nous avons mis en place une expérience dans laquelle nous demandions à des conducteurs âgés de procéder à un encodage allocentrique d'un environnement urbain exploré durant une tâche de conduite automobile simulée. L'efficacité des processus d'encodage pouvait être évaluée en déterminant si les personnes âgées bénéficiaient ou non d'une consigne d'encodage explicite d'apprentissage des repères allocentriques. Si un tel bénéfice était observé, l'hypothèse d'un trouble de la mémoire spatiale au cours du vieillissement qui résulte d'un déficit d'encodage serait confortée et

suggérerait que les difficultés des personnages âgées pour la mémorisation spatiale sont essentiellement présentes lors de l'exploration spatiale de l'environnement.

8. Étude I

8.1. Méthodologie

8.1.1. Participants :

Quatre-vingt dix sujets ont participé à cette étude sur le simulateur de conduite du CI2N (Figure2). Un groupe de conducteurs séniors (âgés de plus de 60 ans) était constitué de 60 participants. Un groupe de jeunes conducteurs (âgés de 18 à 30 ans) incluait 30 participants. Chaque groupe était constitué d'autant de femmes que d'hommes. La tâche sur simulateur proposée aux participants consistait à mémoriser un trajet dans un environnement urbain. Il était précisé pour tous les participants (les 60 sujets séniors et les 30 jeunes conducteurs), que le trajet effectuer devait être mémorisé. Pour un sous-groupe d'automobilistes séniors (i.e. 30 participants), une stratégie cognitive supposée faciliter la mémorisation spatiale, complétait la consigne commune aux trois groupes. Cette étude distinguait ainsi 3 groupes de participants :

- Un groupe de conducteurs jeunes (N = 30), ayant eu la consigne de mémorisation mais sans indication de stratégie cognitive.
- Un groupe de conducteurs séniors (N = 30), ayant eu la consigne de mémorisation sans indication supplémentaire.
- Un groupe de conducteurs séniors (N = 30), ayant eu la consigne de mémorisation, ainsi que l'indication d'une stratégie cognitive pouvant faciliter la mémorisation du trajet.

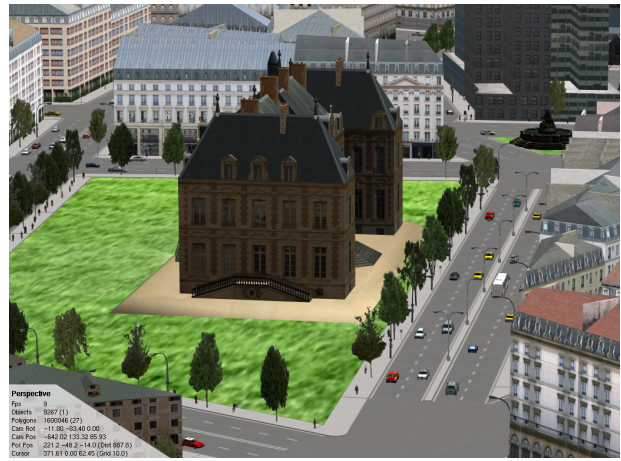


Figure 2 : En haut : deux vues aériennes de la ville constituant l'environnement virtuel du simulateur de conduite du CI2N dans le cadre de la présente étude. En bas : une vue extérieure du simulateur (à gauche) et le poste de contrôle (à droite) d'où peut être visualisé l'ensemble des données de conduite en temps réel lors de la passation expérimentale.

8.1.2. Évaluations Neuropsychologiques :

Seuls les participants séniors (N = 60) ont suivi les deux évaluations neuropsychologiques décrites ci-dessous (section 8.1.2.1). Ces évaluations avaient une double finalité :

- Exclure du protocole tout participant présentant un déficit avéré dans l'une des sphères cognitives estimées par les tests neuropsychologiques. En effet, un score déficitaire peut être associé à une pathologie neurologique liée au vieillissement et qui n'a pas été déclarée lors du bilan médicale préalable à la participation à ce protocole. Or de telles pathologies sont souvent associées à des troubles mnésiques sévères qui pourraient influencer les résultats de notre étude.
- Déterminer si des tests neuropsychologiques sont sensibles aux performances de conduite dans le cas d'une tâche de mémorisation de trajet. Cet objectif s'inscrit dans la recherche actuelle de tests cognitifs pouvant prédire/ estimer les performances de conduites des séniors.

8.1.2.1. *Bilan neuropsychologique de base :*

- l'efficacité intellectuelle : QI verbal, estimé par la version abrégée de la WAIS-R (Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised ; Wechsler, 1989 ; version abrégée de Warrington et al., 1986), et raisonnement non verbal, mesuré par le test des 12 matrices progressives de Raven (Raven, 1985).
- le langage est testé au moyen du test de dénomination DENO-100 (Kremin, 2002).
- la mémoire épisodique est évaluée au moyen de tests de rappel libre en modalité verbale (Rappel libre d'une histoire ; Coughlan et Hollows, 1985) et non verbale (Rappel libre d'une figure complexe ; Coughlan et Hollows, 1985). Les capacités de reconnaissance étaient également évaluées en modalités verbale (Test de reconnaissance des mots ; Warrington, 1984) et non verbale (Test de reconnaissance des visages ; Warrington, 1984).

- les fonctions exécutives sont estimées par des tests de fluences verbales littérale et catégorielle (The Controlled Oral Word Association Test – COWAT ; Benton and Hamsher, 1976), le test de classement de cartes de Wisconsin (version écourtée de Nelson, 1976) et le test des mois à l'envers (Test du National Hospital of London. Cité dans Manning, 2007).
- les capacités attentionnelles sont évaluées par le test des barrages des 0 (Wade et al., 1988).

8.1.2.2. Évaluation neuropsychologique des capacités en lien avec la conduite automobile :

Cette évaluation a été réalisée grâce au Modulo-Test, issu du Vienna Test System (VTS – Schuhfried©). Il s'agit d'une batterie de tests informatisés dont l'objectif est de déterminer si les capacités cognitives d'un conducteur sont adaptées à la pratique de la conduite sur route. Pour la présente étude, 9 sous-tests de cette batterie ont été sélectionnés afin d'évaluer les capacités à réagir et à discriminer des stimuli auditifs ou visuels, le raisonnement non verbal, la mémorisation de scènes routières, les capacités de poursuite visuelle, la coordination bi-manuelle, l'estimation de trajectoires et de distances de sécurité. L'ensemble de ces évaluations a été assuré par le Centre de Réadaptation de Mulhouse (Partenaire).

Les sous-tests du VTS utilisés pour la présente étude sont les suivants :

1. Test de réaction (RT) : Le RT permet d'évaluer la rapidité motrice et la vitesse de réaction des sujets à la présentation d'un stimulus, sonore ou visuel. Le sujet doit également inhiber toute réponse lors de stimuli non pertinents (i.e. distracteurs).
2. Test adaptatif et tachistoscopique de conception de la circulation (ATAVT) : L'ATAVT permet une mesure économique et précise de la capacité d'observation et de l'acquisition d'une vue d'ensemble, à l'aide d'un principe d'évaluation établi et fiable. Ce sous-test évalue la capacité d'observation visuelle et la capacité de perception

globale, ainsi que la performance d'orientation visuelle et la vitesse de perception.

Lors de la passation, des images de situations de la circulation sont présentées aux participants. Le sujet doit répondre à des questions d'observation après présentation de chaque item. Cinq alternatives de réponse sont proposées à chaque question.

3. Cognitrone (COG) : ce test évalue les capacités d'attention et de concentration par la comparaison de figures congruentes.
4. Test de poursuite visuelle (LVT) : ce test a pour objectif de mesurer la capacité d'orientation visuelle pour des structures simples dans un environnement complexe. La tâche du sujet consiste à trouver le plus rapidement possible l'extrémité d'une ligne donnée dans un enchevêtrement de lignes.
5. Test de détermination (DT) : au cours de la passation, le sujet se voit présenter des stimuli de couleurs et des signaux sonores. A chaque stimulus est associée une réponse spécifique (e.g. action par la main dominante, la main non dominante, les pieds gauche ou droit).
6. Adaptive Matrices Test (AMT) : ce test permet une estimation de l'intelligence non verbale du sujet et correspond à une version adaptée du test des matrices de Raven.
7. Test d'Anticipation du temps et du mouvement (ZBA) : il permet d'estimer les capacités du sujet à évaluer les vitesses et mouvements d'objets dans l'espace. A chaque essai, une bille verte en mouvement apparaît sur l'écran. À un moment imprévu, la bille disparaît et deux lignes rouges apparaissent. L'une d'elles se trouve à l'endroit où la bille vient de disparaître. L'autre ligne est la ligne d'arrivée. Le sujet a pour tâche d'appuyer sur une touche au moment où il estime que la bille doit atteindre la ligne d'arrivée.
8. Test de coordination bimanuelle (2HAND) : ce test évalue la précision de la coordination visuo-motrice. La tâche consiste à mouvoir un point rouge sur l'écran à

l'aide de deux boutons rotatifs ou de deux manettes, sur une trajectoire prédéfinie. Cette trajectoire comprend trois sections, qui posent différentes exigences à la coordination d'une main ou des deux

9. Test de perception périphérique (PP) : évalue la capacité de perception visuelle dans le champ visuel périphérique et permet d'estimer l'étendue du champ visuel utile.

8.1.3. Évaluation des déficits spatiaux en conduite automobile

8.1.3.1. Tâche de mémorisation de trajet sur le simulateur de conduite

Nous avons évalué les capacités spatiales des personnes âgées en situation de conduite automobile, ainsi que leur habileté à élaborer une carte mentale d'un trajet, par comparaison à un groupe contrôle de jeunes conducteurs. A cette fin, nous avons demandé à l'ensemble des sujets de réaliser une tâche de mémorisation de trajet dans une ville virtuelle sur le simulateur de conduite. Cette tâche était constituée de deux phases :

- Phase d'apprentissage : les sujets devaient réaliser 3 fois un même trajet de 1,5 km dans une ville virtuelle. Sur le parcours, des panneaux fléchés indiquaient aux sujets le trajet à suivre (Figure 3). Tous les participants ont été avertis d'un rappel ultérieur du parcours. Pour 30 automobilistes seniors, une consigne supplémentaire était donnée (i.e. une stratégie cognitive devant faciliter la mémorisation spatiale). Plus précisément, il leur a été demandé de porter leur attention sur les éléments (ex. bâtiments, monuments) jalonnant leur parcours.
- Phase de test : Les participants devaient réaliser le même trajet en sens inverse, et ce immédiatement (J0) et 15 jours (J15) après la phase d'apprentissage. Il est à noter que lors de la session à 15 jours, les sujets ne réalisaient pas de nouvelle phase d'apprentissage, l'objectif de cette session étant d'étudier l'efficacité de la mémorisation du trajet à long terme. Lors de cette phase de test, les panneaux fléchés indiquant lors de la phase

d'apprentissage le trajet à suivre étaient absents. Les participants disposaient de 5 minutes pour accéder à l'emplacement final (i.e. correspondant au point de départ de la phase d'apprentissage). Si les 5 minutes étaient atteintes, le test était arrêté et considéré comme un échec. Différents paramètres de conduite du véhicule étaient enregistrés à une fréquence de 10Hz lors de cette phase :

- La vitesse du véhicule.
- Le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur.
- La position du véhicule afin d'enregistrer le trajet emprunté par les sujets.



Figure 3 : A gauche : vue aérienne de la ville virtuelle dans laquelle les sujets évoluaient à l'aide du simulateur. Le parcours à mémoriser est tracé en jaune sur le plan de la ville. A droite : exemple de panneau jalonnant le parcours lors de la phase de mémorisation et indiquant au sujet le trajet à suivre.

8.1.3.2. Épreuves d'évaluation de la mémoire spatiale

A l'issue des deux phases de test (à J0 et à J15), les sujets effectuaient une batterie d'épreuves d'évaluation de la mémoire spatiale, dans une pièce adjacente à celle du simulateur. Cinq épreuves constituaient cette batterie :

- Épreuve de rappel libre : le sujet a pour tâche de rappeler le maximum d'éléments environnementaux saillants observés lors du trajet (e.g. monuments, magasins).

- Épreuve de traçage du parcours sur un plan sans indice : le sujet devait tracer sur un plan indiquant simplement les rues de la ville virtuelle et le point de départ du parcours (Figure 4), le trajet qu'il avait effectué lors de la phase de test.
- Épreuve de traçage du parcours sur un plan avec indices : la tâche est identique à la précédente. Cependant le plan présenté au sujet associe aux différentes rues de la ville les éléments urbains constitutifs (e.g., immeuble, parcs, monuments).
- Épreuve de localisation d'éléments urbains : sur un plan sans repère de la ville virtuelle (i.e. présentant uniquement les rues et le point de départ du trajet), le sujet devait pointer la localisation de 10 éléments urbains (e.g., monuments) qu'il avait pu observer lors de son trajet.
- Épreuve informatisée de reconnaissance de lieux : cette épreuve était constituée de 20 essais. A chaque essai, un élément urbain était affiché à l'écran d'ordinateur (Figure 5). Le sujet devait indiquer, à l'aide de deux touches du clavier (O ou N), s'il avait observé ou non l'élément présenté lors de son trajet. Pour la moitié des essais, le stimulus était inclus dans le trajet alors que pour l'autre moitié, l'élément présenté était nouveau.



Figure 4 :Plans sans indices (à gauche) et avec indices (à droite) présentés aux sujets lors des épreuves de traçage du trajet de la phase de test. Le "D" (cerclé rouge en bas à gauche de chaque plan) indique au sujet le point de départ du trajet.



Figure 5 :Exemples d'items présentés lors de l'épreuve de reconnaissances de lieux. Les trois items du haut sont des éléments présents sur le trajet de la phase test, alors que les trois éléments du dessous sont des éléments non rencontrés sur le parcours.

8.2. Résultats

8.2.1. Analyse des données obtenues sur simulateur

8.2.1.1. Taux de réussite et d'échec à la phase de test

Au sein des 3 groupes de sujets, nous avons comptabilisé :

- les participants ayant réalisé le parcours sans erreur lors de la phase test à (i.e. retour dit « parfait »),
- ceux ayant retrouvé le point de départ mais en ayant emprunté des rues erronées (i.e. retour dit « indirect »)
- les sujets n'ayant pas réussi avant les 5 minutes imparties, à retrouver le point d'arrivée (i.e. échec).

Les taux de retours parfaits, de retours indirects et d'échecs sont représentés sur la figure 6, pour chacun des groupes de participants, aux sessions J0 et J15. Aux sessions J0 et J15, les proportions de participants ayant réussi un retour parfait ou indirect et ceux ayant échoué à la phase de test diffèrent entre les trois groupes ($X^2 = 14,74$; $p < 0,01$ et $X^2 = 16,22$; $p < 0,01$). En comparant les proportions par paire de groupes, nous observons que les proportions observées chez les sujets

jeunes diffèrent significativement de celles observées chez les séniors n'ayant pas reçu de consigne de stratégie cognitive, aussi bien à la session J0 qu'à la session J15 ($X^2 = 7,76$; $p < 0,01$ et $X^2 = 18,65$; $p < 0,01$ respectivement). Ces différences entre les deux groupes semblent s'expliquer, pour les deux sessions de la phase de test, par un taux d'échec plus élevé pour le groupe de séniors comparativement aux conducteurs jeunes : à J0, 40% contre 21% et à J15, 71% contre 35%.

Les analyses statistiques ne révèlent aucune différence significative entre les proportions de sujets jeunes ayant réussi un retour parfait ou indirect et celles des séniors ayant reçu une consigne de stratégie cognitive, aussi bien à la session J0 qu'à la session J15 ($X^2 = 0,48$; $p = 0,49$ et $X^2 = 0,76$; $p = 0,38$ respectivement). En d'autres termes, les taux de réussites (« parfait » ou « indirectes ») sont équivalents entre les deux groupes. Par contre, les proportions de réussites et d'échecs diffèrent significativement entre les deux groupes de conducteurs séniors à J0 et J15 ($X^2 = 11,93$; $p < 0,01$ et $X^2 = 12,19$; $p < 0,01$ respectivement). L'analyse qualitative des résultats semblent indiquer que ces différences relèvent de la proportion d'échecs plus importante chez les séniors n'ayant eu aucune consigne d'encodage explicite, comparativement à leurs pairs ayant suivi une stratégie cognitive lors de la phase d'apprentissage, et ce lors des deux sessions : à J0, 49% contre 12% et à J15, 71% contre 22%.

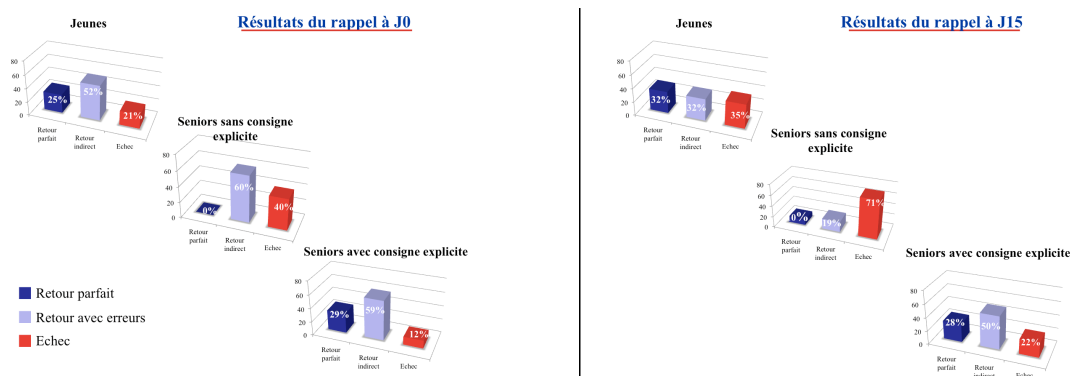


Figure 6 : Taux de retours parfaits, de retours indirects et d'échecs, pour les groupes de sujets jeunes, de séniors n'ayant eu aucune consigne d'encodage et de séniors ayant bénéficié d'une stratégie cognitive, aux sessions J0 et J5.

8.2.1.2. *Analyses des paramètres de conduite*

Les paramètres du simulateur enregistrés lors des deux sessions de test, nous ont permis d'analyser les variables suivantes pour les 3 groupes de participants :

- Le nombre de voies empruntées de manière erronée, c'est-à-dire le nombre de rues dans lesquelles le sujet s'est engagé lors de la phase de test, mais qui ne constituaient le trajet initial lors de la phase d'apprentissage.
- Le temps moyen pour réaliser le trajet.
- Le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur lors du parcours.
- La vitesse moyenne du véhicule lors du rappel du trajet.

Ces paramètres ont été uniquement analysés pour les participants de chaque groupe ayant réalisé un retour parfait ou indirect. En excluant les conducteurs en échec lors de la phase de test, les effectifs des 3 groupes étaient les suivants :

- Conducteurs jeunes, N = 20 ;
- Sujets seniors n'ayant pas reçu de consigne d'encodage, N = 12 ;
- Participants seniors ayant suivi une stratégie cognitive, N = 20.

Les résultats de ces différents paramètres pour les 3 groupes de participants sont représentés sur la figure 7. Les analyses statistiques montrent un effet de groupe pour les 4 variables étudiées : nombre de rues erronées empruntées, temps moyen de réalisation du trajet, vitesse moyenne du véhicule et nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur (avec respectivement $F_{[2,49]} = 7,07$; $p < 0,01$; $F_{[2,49]} = 3,50$; $p = 0,04$; $F_{[2,49]} = 5,19$; $p = 0,01$; $F_{[2,49]} = 4,08$; $p = 0,02$). Les analyses post-hoc montrent que les seniors n'ayant pas eu de consigne d'encodage supplémentaire, ont emprunté un nombre de rues erronées significativement plus élevé que les sujets jeunes et leurs pairs ayant bénéficié d'une stratégie cognitive ($p < 0,01$ dans deux cas). Par contre, les seniors ayant eu une consigne d'encodage supplémentaire ont des performances similaires à celles des sujets jeunes ($p = 0,47$). Le temps moyen de réalisation du parcours des seniors n'ayant eu aucune consigne

d'encodage est significativement plus élevé que celui réalisé par les sujet jeunes ($p = 0,04$). Nous ne relevons aucune autre différence significative pour les autres comparaisons par paire de groupes, pour le temps moyen de parcours. Les analyses post-hoc montrent que la vitesse moyenne du véhicule lors des phases de test est significativement plus élevée pour le groupes de sujets jeunes et les séniors ayant bénéficié d'une consigne d'encodage comparativement à l'autre groupe de séniors ($p < 0,01$ dans les deux cas). Par contre, la vitesse moyenne des véhicules est équivalente entre le groupe de sujets jeunes et celui des conducteurs séniors ayant suivi une stratégie cognitive ($p = 0,77$). Enfin, les analyses révèlent que le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur chez les sujets jeunes, ainsi que chez les séniors ayant bénéficié d'une consigne d'encodage supplémentaire, est significativement inférieur au nombre d'appui observé dans le groupe de séniors sans consigne d'encodage ($p = 0,01$ et $p = 0,02$ respectivement). Par contre, nous n'observons aucune différence significative entre les sujets jeunes et les séniors ayant suivi une stratégie d'encodage ($p = 0,83$).

Pour chacune des variables étudiées, les analyses ne révèlent aucun effet du facteur « session » (i.e. J0 et J15) et aucune interaction entre les facteurs « groupe » et « session ».

Paramètres de conduites

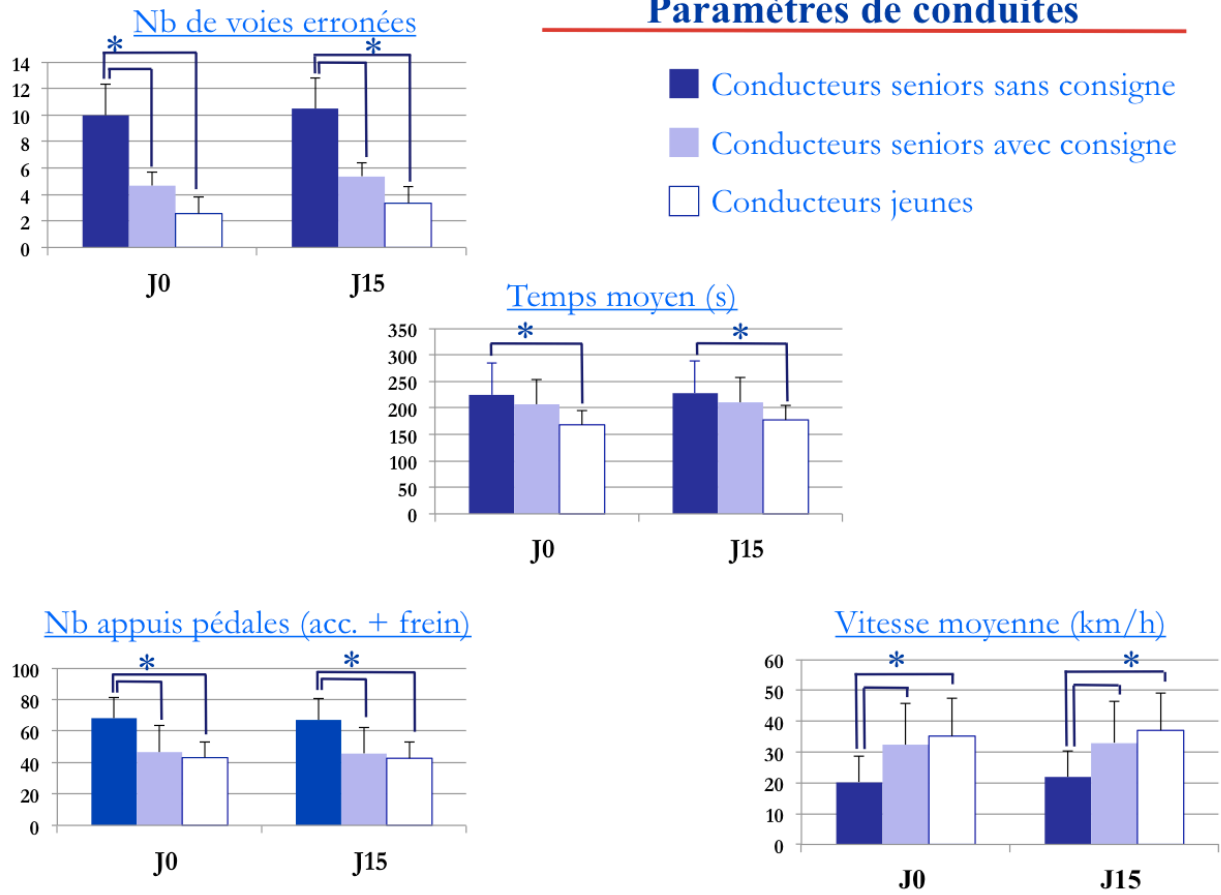


Figure 7 : Nombre de voies empruntées de manière erronée, temps moyen et vitesse moyenne de réalisation du parcours, et nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur durant le trajet pour les participants des trois groupes ayant réussi la phase de test (i.e. parcours parfait ou indirect). Les astérisques (*) indiquent les effets significatifs entre les groupes (avec un seuil fixé à 0,05).

8.2.2. Analyses des scores aux épreuves d'évaluation de la mémoire spatiale

Des analyses statistiques ont été réalisées sur les scores obtenus par les 3 groupes de participants aux 5 épreuves qui constituaient la batterie d'évaluation de la mémoire spatiale :

- Épreuve de rappel libre.
- Épreuve de traçage du parcours sur un plan sans indice.
- Épreuve de traçage du parcours sur un plan avec indices.
- Épreuve de localisation d'éléments urbains.
- Épreuve de reconnaissance de lieux.

Nous ne présentons pas les résultats à l'épreuve de rappel libre, les résultats n'ayant pas révélé d'effets significatifs. Pour toutes les analyses, nous avons considéré les facteurs « groupes » et « sessions » (i.e., J0 et J5). Seuls des effets du facteur groupe ont été observés. Par conséquent, nous ne présenterons pas ici, par soucis de simplification de la présentation des résultats, les analyses portant sur le facteur « session » et sur les interactions entre nos deux facteurs d'intérêt.

Les résultats des trois groupes aux épreuves de traçage du parcours sur un plan présentant ou non des indices, sont illustrés sur la figure 8. Les analyses statistiques montrent un effet de groupe pour les épreuves avec ou sans indices ($F_{[2,90]}=17,31$; $p < 0,01$ et $F_{[2,90]}=17,09$; $p < 0,01$ respectivement). Les analyses post-hoc montre que pour l'épreuve avec un plan sans indice, les deux groupes de conducteurs seniors, ayant bénéficié ou non d'une stratégie d'encodage, ont un nombre d'erreurs significativement supérieurs à celui des sujets jeunes ($p = 0,01$ et $p < 0,01$ respectivement). Nous observons également que les seniors n'ayant pas bénéficié d'une consigne supplémentaire d'encodage ont commis significativement plus d'erreurs que leurs pairs ayant bénéficié d'une consigne d'encodage ($p = 0,04$). Pour l'épreuve de traçage du parcours sur un plan indicé, les seniors n'ayant eu aucune consigne supplémentaire, ont réalisé significativement plus d'erreurs que leurs pairs et le groupe de sujets jeunes ($p = 0,01$ dans les deux cas). Par contre, les seniors ayant bénéficié

d'une stratégie d'encodage présentent des performances similaires à celles des sujets jeunes ($p = 0,67$).

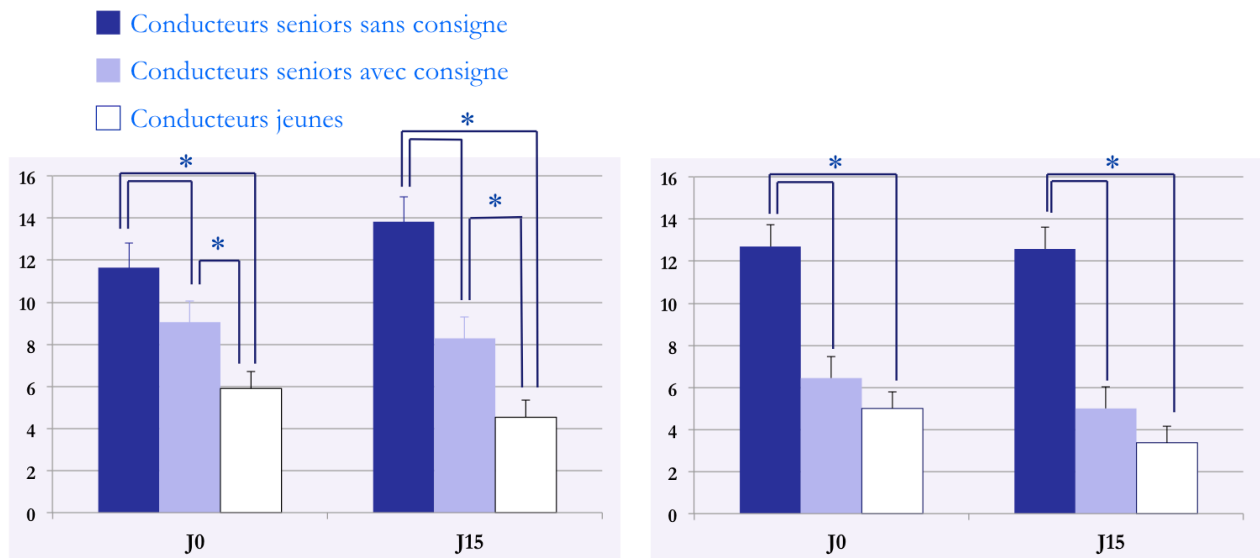


Figure 8 : Nombres moyens d'erreurs comptabilisées pour chaque groupe lors de l'épreuve de traçage du trajet sur un plan sans indice (à gauche) et avec indice (à droite), pour les sessions à J0 et J15. Les astérisques (*) indiquent les effets significatifs entre les groupes (avec un seuil fixé à 0,05).

Les résultats des trois groupes à l'épreuve de reconnaissance de lieux sont illustrés sur la figure 9. Les analyses de variances révèlent un effet de groupe pour l'épreuve de reconnaissance des lieux ($F_{[2,90]} = 5,10$; $p = 0,01$). Les analyses post-hoc montrent que les sujets jeunes et les seniors ayant bénéficié d'une stratégie d'encodage, ont un taux de reconnaissance statistiquement plus élevé que celui des seniors n'ayant eu aucune consigne supplémentaire ($p < 0,01$ dans les 2 cas). Les conducteurs seniors ayant suivi une stratégie cognitive ont des performances similaires à celles de sujets jeunes ($p = 0,35$).

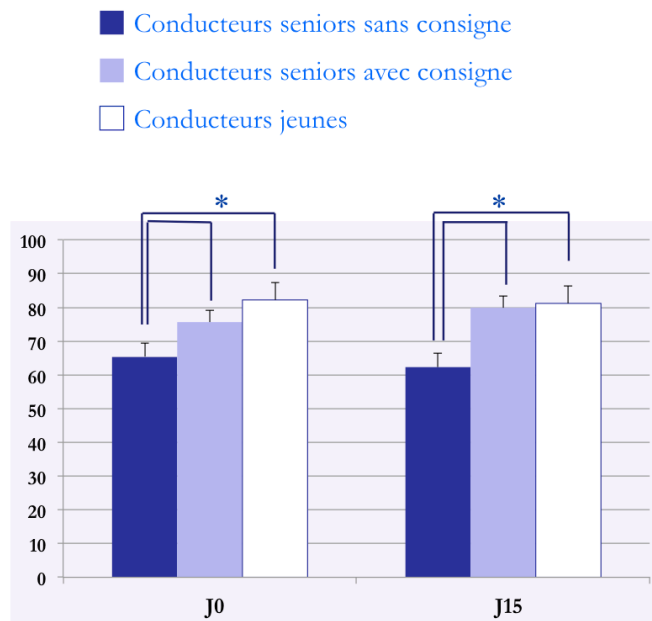


Figure 9 : Pourcentages moyens de reconnaissances correctes pour chaque groupe lors de l'épreuve de reconnaissance des lieux, pour les sessions à J0 et J15.

8.2.3. Analyses corrélationnelles entre les scores aux tests neuropsychologiques et les performances au test de conduite simulée

Afin de déterminer si les tests neuropsychologiques sont de bons prédicteurs des performances de conduite dans le cas d'une tâche de mémorisation de trajet, nous avons réalisé des analyses corrélationnelles non paramétriques (test de corrélation de Spearman) entre les scores aux différentes tests neuropsychologiques et l'ensemble des paramètres de conduite mesurés lors de la tâche de rappel du parcours. Ces analyses ont été réalisées sur les données obtenues auprès des sujets seniors n'ayant pas bénéficié de la consigne de stratégie d'encodage (N = 30).

Les tests neuropsychologiques ayant fait l'objet de ces analyses incluent :

- les tests de notre ligne de base : scores aux tests de QI verbal et non verbal, de dénomination, de mémoire épisodique, des fonctions exécutives et d'attention.
- les tests du VTS (Schuhfried©) : scores aux sous-tests RT, ATAVT, COG, LVT, DT, AMT, ZBA, 2HAND et PP.

Afin de rendre compte des performances de conduite des participants dans le cadre de notre tâche de mémorisation spatiale, nous avons calculé pour chaque sujet un indice de performance P, incluant ses performances à la tâche de navigation, ainsi que ses performances de conduite. Plus la valeur de cet indice est élevée, plus le sujet a été performant sur l'ensemble des tâches proposées. Pour déterminer cet indice, nous avons calculé pour chaque sujet le score z, à partir de la moyenne et de l'écart-type du groupe, de leur performance aux tests suivants :

- Épreuve de rappel libre.
- Épreuve de traçage du parcours sur un plan sans indice.
- Épreuve de traçage du parcours sur un plan avec indices.
- Épreuve de localisation d'éléments urbains.
- Épreuve de reconnaissance de lieux.

Nous avons également calculé le score z pour les paramètres de conduite mesurés pour chaque sujet :

- Le nombre de voies empruntées de manière erronée.
- Le temps moyen pour réaliser le trajet.
- Le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur lors du parcours.
- La vitesse moyenne du véhicule lors du rappel du trajet.

L'indice P de chaque sujet correspond à la moyenne des 9 scores z.

Les analyses statistiques révèlent une corrélation positive significative entre l'indice P et les scores aux 3 tests neuropsychologiques suivantes :

- QI verbal (version abrégée) de la WAIS-R ($t_{[28]} = 2,20$; $R = 0,38$; $p = 0,04$)
- test des 12 matrices progressives de Raven ($t_{[28]} = 2,04$; $R = 0,36$; $p = 0,05$)
- sous-test AMT (Schuhfried©) ($t_{[28]} = 2,15$; $R = 0,39$; $p = 0,04$)

Pour tous les scores aux autres tests neuropsychologiques, aucune corrélation significative n'est observée entre ces paramètres et l'indice P.

9. Étude II

Les résultats de l'étude I montrent clairement que si des séniors appliquent une stratégie cognitive basée sur l'encodage de repères (e.g. bâtiments, monuments) dans un environnement (i.e. la ville virtuelle dans notre étude), des améliorations substantielles sont observées tant de leurs capacités à mémoriser un trajet que de leurs performances de conduite automobile. Les séniors qui n'ont pas bénéficié de l'enseignement d'une telle stratégie présentaient des performances cognitives spatiales et de conduite significativement inférieures à celles des sujets jeunes. Par contre, les séniors qui ont appliqué la consigne d'encodage montraient des résultats similaires à ceux des sujets jeunes.

La littérature révèle que les séniors présentent essentiellement des difficultés à conduire dans des environnements nouveaux (Eberhard, 1996 ; Fontaine, 2003 ; Van Elsande, 2003). Par ailleurs, les erreurs de conduite s'accroissent significativement lorsque les séniors sont amenés à utiliser un système GPS afin de suivre un trajet dans cet environnement jusque là non exploré (Porter et Whitton, 2002). Cette diminution des performances de conduite chez les séniors qui utilisent un système GPS résulterait du fait que l'emploi de ces outils augmente le nombre de tâches à gérer lors de la conduite, nécessitant une distribution efficace des ressources cognitives (Chaparro et al. 2005). Or les processus permettant la gestion de ces ressources sont altérés dans le vieillissement (Krampe et al., 2003).

Nous avons tenté de tirer profit des résultats de l'étude I, en élaborant (Renault SA), un système de cartographie qui présente un trajet schématisé que le conducteur devra réaliser ultérieurement. Ce système doit faciliter la mémorisation du trajet chez les séniors par un affichage, sur le trajet schématisé, des éléments urbains caractéristiques et facilement reconnaissables le long du parcours (églises, monuments, parcs...). Ainsi, plutôt que d'inciter les personnes âgées à adopter les stratégies exploratoires durant un parcours, et d'accroître la mobilisation de leurs ressources cognitives par l'utilisation d'un système GPS, nous avons testé

l'efficacité de la mémorisation préalable d'un parcours sur les performances de conduite des séniors. La mise en place d'un tel système de mémorisation d'un parcours a pour objectif d'amener les personnes âgées à se construire plus facilement une carte mentale avant le trajet et de réduire ainsi l'effort cognitif pendant la conduite.

9.1. Méthodologie

9.1.1. Participants :

Soixante conducteurs séniors (âgés de plus de 60 ans) ont participé à cette étude sur le simulateur de conduite du CI2N. Aucun des participants à cette étude n'avait participé à l'étude I. Chaque groupe était constitué d'autant de femmes que d'hommes.

9.1.2. Évaluation du système de mémorisation préalable du parcours

La tâche sur simulateur proposée aux participants consistait à réaliser un trajet dans un environnement urbain, après avoir mémorisé ce trajet sous sa forme schématique. Le schéma de la ville et du parcours urbain était présenté sur une tablette Ipad2 (Apple®) : ce dispositif informatisé permettait au participant d'explorer la représentation schématisée pour faciliter la mémorisation du parcours (i.e. zoom, rotation). Pour la moitié des participants (N = 30), le plan était uniquement composé de segments représentant les rues de la ville (Figure 10 - en bas à gauche). Pour l'autre moitié des participants, le trajet était présenté sur un plan agrémenté de repères saillants jalonnant le parcours (Figure 10 - en bas à gauche). Dans les deux conditions, des repères marqués « D » et « A » précisaient sur le plan respectivement les points de départ et d'arrivée du parcours. Tous les participants disposaient de 5 minutes pour consulter le plan. La mémorisation du trajet par le dispositif informatisé était réalisée dans l'habitacle du simulateur de conduite. Après le temps de consultation imparti, le dispositif informatisé passait automatiquement en veille et n'était plus visible à l'écran. Le conducteur était alors invité à démarrer le simulateur est à

effectuer le trajet préalablement présenté schématiquement. Le parcours était de 1500 m et comportait 12 changements de direction. Chaque participant disposait de 5 minutes pour rejoindre le point d'arrivée du parcours.

Différents paramètres de conduite du véhicule étaient enregistrés lors de la tâche de conduite, à une fréquence de 10Hz:

- La vitesse du véhicule.
- Le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur.
- La position du véhicule pour le suivi du trajet emprunté par les sujets.

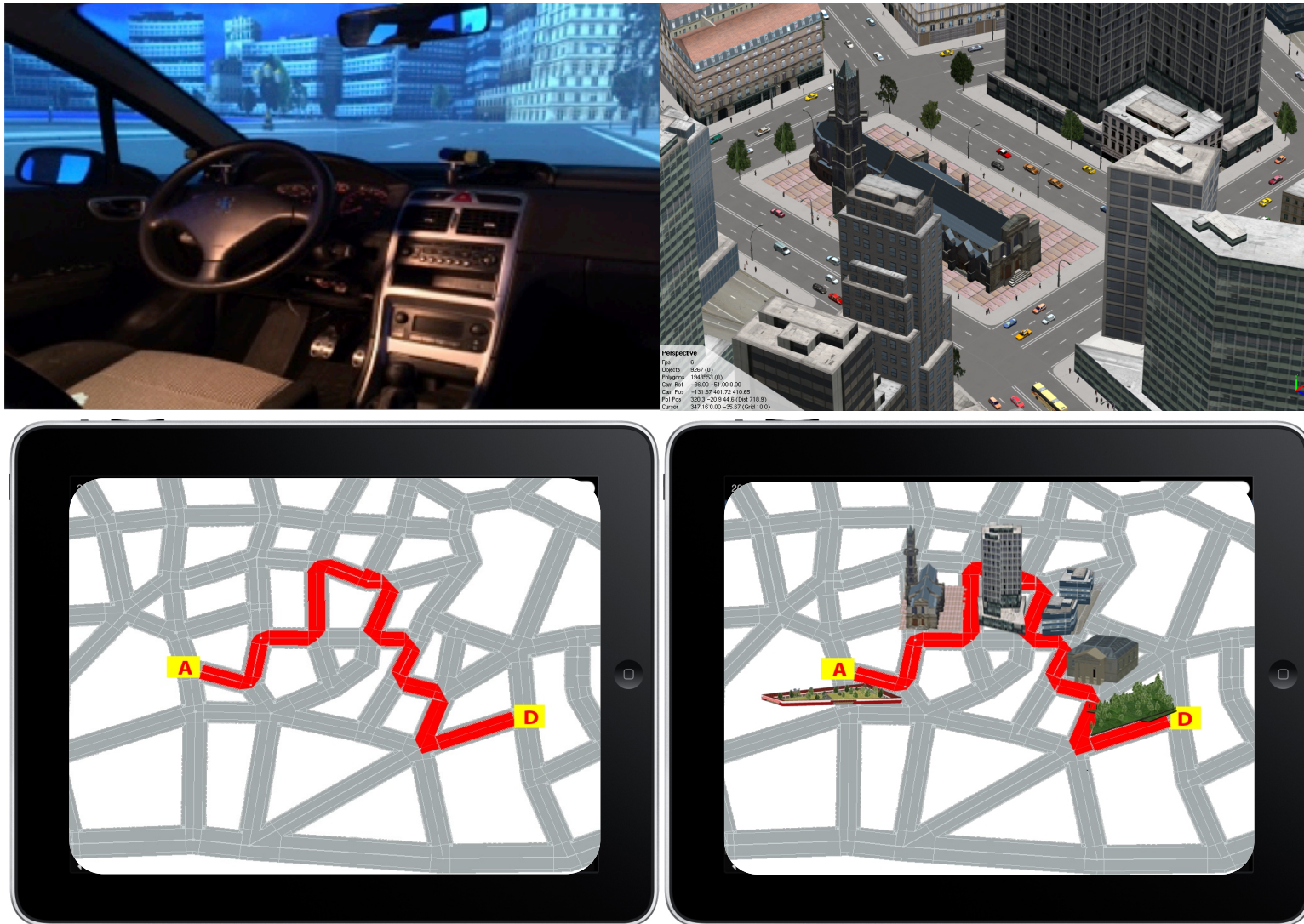


Figure 10 : En haut : Dans l'expérience II, 60 séniors ont pour tâche de réaliser dans le simulateur de conduite un trajet dans la ville virtuelle. En bas : Avant de réaliser la tâche, le parcours est présenté schématiquement sur un support visuel. Pour la moitié des participants (N = 30), le trajet est présenté sur un plan dépourvu de repères, c'est-à-dire uniquement par des segments représentant les rues de la ville (à gauche). Pour l'autre moitié des participants, le trajet est présenté sur un plan agrémenté de repères saillants jalonnant le parcours (à droite).

9.2. Résultats

L'ensemble des analyses statistiques a consisté à comparer les performances des deux groupes de seniors, c'est-à-dire des les sujets ayant bénéficié d'un schéma détaillé et de ceux n'ayant eu à disposition qu'un simple tracé du parcours lors de la phase préalable de mémorisation.

9.2.1. Taux de réussite à la réalisation du parcours

Au sein des 2 groupes de sujets, nous avons comptabilisé :

- les participants ayant réussi à réaliser le parcours sans erreur (i.e. trajet dit « parfait »),
- ceux ayant atteint le point d'arrivée mais en ayant emprunté des rues erronées (i.e. trajet dit « indirect »)
- les sujets n'ayant pas réussi à atteindre le point d'arrivée (i.e. échec).

Les taux de trajets parfaits, de trajets indirects et d'échecs sont représentés sur la figure 11, pour chacun des 2 groupes de participants. Les proportions de participants ayant réussi un retour parfait ou indirect et ceux ayant eu un échec à la phase de test diffèrent entre les deux groupes ($X^2 = 0,54$; $p = 0,051$). Cependant, le nombre de participants ayant réussi en trajet direct ou indirect ne diffère pas significativement entre les deux conditions expérimentales.

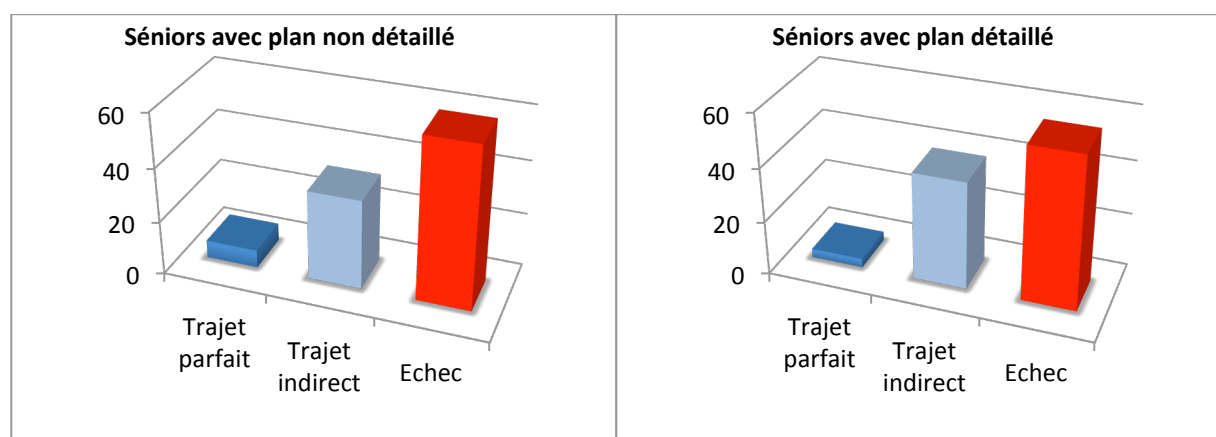


Figure 11 : Taux de trajets parfaits, de trajets indirects et d'échecs, pour les 2 groupes de conducteurs seniors : à gauche, les taux des participants ayant eu à disposition un schéma simplifié du parcours à mémoriser et à droite, ceux des seniors ayant bénéficié d'un plan détaillé du parcours lors de la phase de mémorisation.

9.2.2. Analyses des paramètres de conduite

Les paramètres du simulateur enregistrés lors de la session de test, nous ont permis d'analyser les variables suivantes pour les 2 groupes de participants :

- Le nombre de voies empruntées de manière erronée, c'est-à-dire le nombre de rues dans lesquelles le sujet s'est engagé lors de la phase de test, mais qui ne faisaient pas parti du trajet présenté lors de la phase de mémorisation.
- Le temps moyen pour réaliser le trajet.
- Le nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur lors du parcours.
- La vitesse moyenne du véhicule lors du trajet.

Ces paramètres ont été uniquement analysés pour les participants de chaque groupe ayant réalisé un trajet parfait ou indirect. En excluant les conducteurs en échec lors de la réalisation du parcours dans le simulateur de conduite, les effectifs des 2 groupes étaient les suivants :

- Sujets seniors ayant eu à disposition un schéma simplifié du parcours à mémoriser, N = 12 ;
- Participants seniors ayant bénéficié d'un plan détaillé du parcours lors de la phase de mémorisation, N = 13

Les résultats de ces différents paramètres pour les 2 groupes de participants sont représentés sur la figure 12. Les analyses statistiques ne montrent aucun effet de groupe pour les 4 variables étudiées : nombre de rues erronées empruntées, temps moyen de réalisation du trajet, vitesse moyenne du véhicule et nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur (avec respectivement $t_{[23]} = 0,47$; $p = 0,64$; $t_{[23]} = 1,23$; $p = 0,23$; $t_{[23]} = 0,19$; $p = 0,85$; $t_{[23]} = 0,82$; $p = 0,42$).

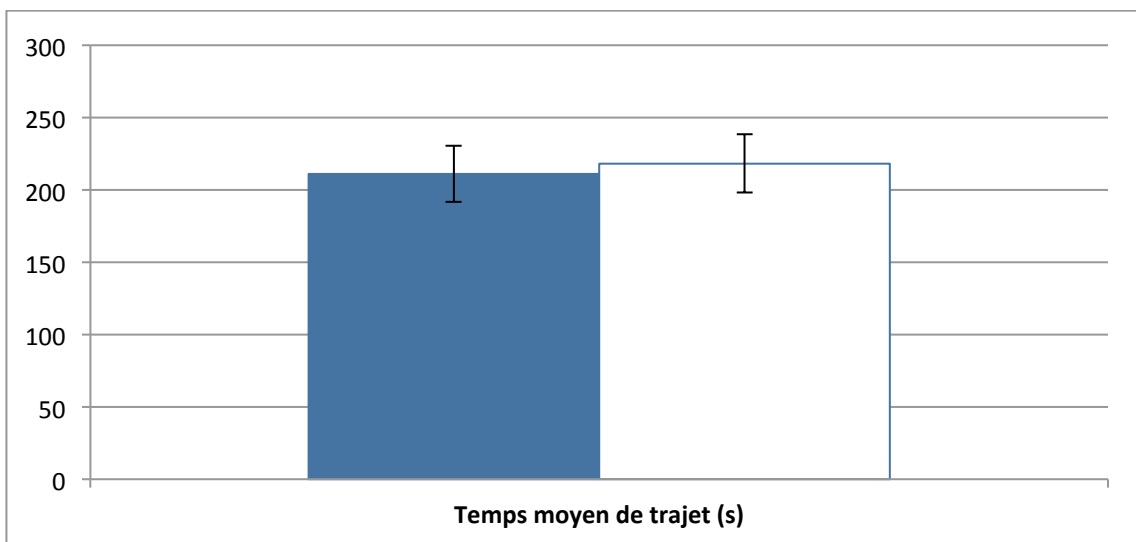
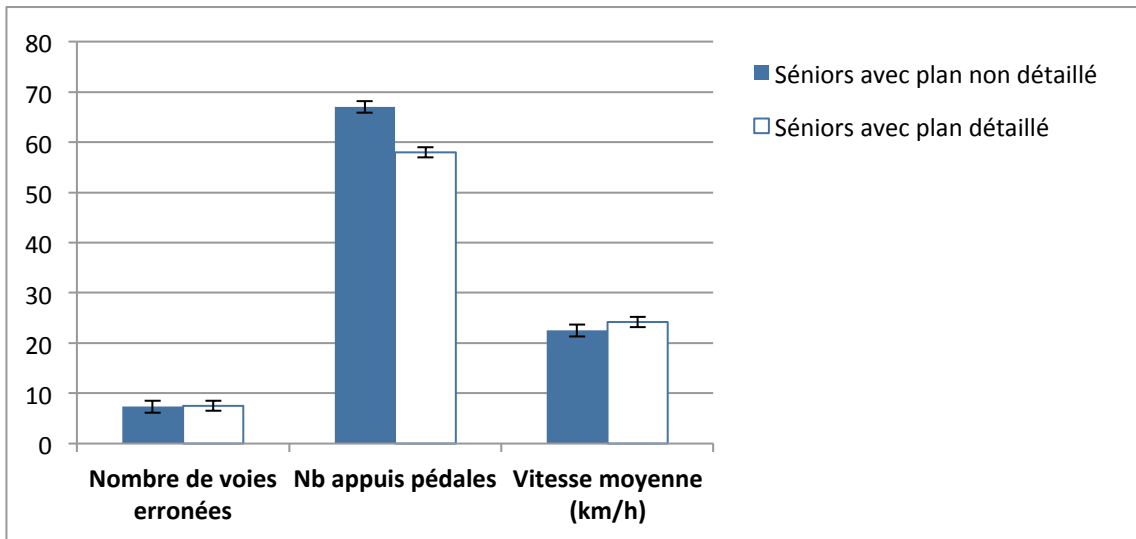


Figure 12 : Nombre de voies empruntées de manière erronée, vitesse moyenne de réalisation du parcours, nombre d'appuis sur les pédales de frein et d'accélérateur et temps moyen de réalisation du trajet pour les participants des 2 groupes de séniors de l'étude II : les séniors ayant eu à disposition un schéma simplifié du parcours à mémoriser et les séniors ayant bénéficié d'un plan détaillé du parcours lors de la phase de mémorisation

10. Conclusion

Les résultats de cette étude confirment que les conducteurs séniors ont plus de difficultés que les jeunes automobilistes à mémoriser leur environnement routier. De plus, nous observons que lorsque les séniors sont confrontés à un environnement urbain nouveau dans lequel ils doivent mémoriser un trajet, leur conduite peut considérablement perturber la fluidité du trafic : d'une part, leur vitesse moyenne de déplacement est significativement plus faible que celle des conducteurs jeunes (environ 20 km/H contre 35 km/h), et, d'autre part, les séniors utilisent plus fréquemment les pédales d'accélérateur et de frein que les autres conducteurs, comportement indiquant une conduite plus « saccadée » et moins assurée. Ces premiers résultats confirment notre prédiction selon laquelle l'exploration d'un environnement routier nouveau peut perturber considérablement la conduite des séniors. Cette prédiction se basait sur notre hypothèse principale stipulant que l'altération de la mémoire spatiale, généralement observée au cours du vieillissement, peut particulièrement perturber les séniors lorsqu'ils conduisent dans un environnement nouveau (i.e. jamais exploré). Dans notre étude, nous avons exposé les séniors à une telle situation en leur demandant de mémoriser un trajet, tâche sollicitant particulièrement le traitement spatial allocentrique des éléments urbains. Nos résultats confirment que les séniors ont d'importantes difficultés à réaliser une telle tâche, tant en termes de performances de conduite que de mémorisation du trajet. Le trouble de la mémoire spatiale semble induire chez les conducteurs séniors une mobilisation importante des ressources cognitives (i.e. attentionnelles) au détriment d'autres fonctions, telles que les fonctions exécutives, nécessaires pour la planification et la gestion efficace de l'ensemble des actions nécessaires lors de la conduite automobile.

Pour évaluer la sensibilité des tests neuropsychologiques aux performances de conduite dans le cas d'une tâche de mémorisation de trajet, nous avons réalisé des analyses corrélationnelles entre la valeur d'un indice P, représentant un score de performance de nos sujets séniors à l'ensemble des tâches de navigation spatiale, et les scores aux différents tests neuropsychologiques. Les résultats

rèvelent que les séniors les plus performants sont ceux dont l'efficacité intellectuelle est la plus élevée (QI verbale et non verbale). Par contre, les évaluations relevant de tests ciblant des fonctions cognitives plus spécifiques (e.g. mémoire épisodique, attention, fonctions exécutives) ne semblent pas présenter un lien avec les performances globales des sujets à notre tâche de navigation spatiale. Nos résultats semblent conforter l'hypothèse rencontrée de plus en plus fréquemment dans la littérature, hypothèse selon laquelle une évaluation cognitive des séniors pour déterminer leur capacité à conduire ou non, ne peut être circonscrite à quelques tests ciblant des fonctions spécifiques, mais doit correspondre à une évaluation globale et complexe, estimant l'efficacité cognitive globale du sujet (Antskey et al., 2006 ; Choi et al., 2013 ; Kowalski et al., 2012).

Un des aspects les plus novateurs de notre étude est qu'elle montre que des performances cognitives diminuées par le vieillissement normal ne représentent pas un frein systématique aux capacités de conduite automobile. En effet, nous avons montré dans notre étude, que des altérations cognitives dans le vieillissement peuvent être contrecarrées par des stratégies qui peuvent avoir un impact positif sur les performances de conduite du séniors. Ainsi les difficultés de mémorisation d'un trajet dans un environnement nouveau chez les séniors, peuvent être considérablement amoindries si une stratégie d'encodage est proposée au préalable à ces conducteurs. Nous observons que lorsque nous indiquons simplement aux séniors, avant la réalisation de la tâche, de prêter une attention particulière aux éléments urbains qui jalonnent le parcours qu'ils doivent mémoriser, leurs performances de conduite, ainsi que de rappel du trajet, sont alors similaires à celles des sujets jeunes. En d'autres termes, le fait d'indiquer une stratégie d'encodage aux séniors permet à ces conducteurs de mémoriser plus rapidement le nouvel environnement et, par conséquent, de mobiliser les ressources attentionnelles moins longtemps pour la mémorisation spatiale, au bénéfice des autres fonctions cognitives nécessaires à la conduite automobile. Un autre résultat remarquable est que ce bénéfice semble s'établir à long terme, puisque nos données indiquent que les

conducteurs séniors ayant bénéficié d'une stratégie d'encodage lors de la phase de mémorisation présentent des performances de rappel et de conduite similaires à celle des jeunes conducteurs, aussi bien le jour même de l'encodage que 15 jours plus tard. Bien que notre étude confirme que la majorité des conducteurs séniors présente des troubles dans la mémorisation spatiale, nous montrons également et surtout que ces déficits peuvent être palliés par des stratégies cognitives adaptées pour faciliter la mémorisation et libérer plus rapidement des ressources attentionnelles nécessaires à une conduite automobile « fluide ».

Dans notre seconde étude, nous avons tenté de tirer profit des résultats de l'étude I, en élaborant (Renault SA), un système de cartographie qui présente un trajet schématisé que le conducteur devait réaliser ultérieurement. Ce système devait faciliter la mémorisation du trajet chez les séniors par un affichage, sur le trajet schématisé, d'éléments urbains caractéristiques et facilement reconnaissables le long du parcours (églises, monuments, parcs...). Cependant, le résultat escompté n'a pas été observé. Les conducteurs séniors ne tiraient aucun bénéfice des informations spatiales fournies par le système avant la réalisation du trajet. La recherche devrait être poursuivie dans cette voie pour trouver une alternative satisfaisante aux systèmes de navigation actuels. Une réflexion devrait être menée quant à l'adaptation de ces systèmes aux altérations cognitives liées au vieillissement.

11. Bibliographie

Anstey K.J., Wood J., Lord S. & Walker J.G. (2005). Cognitive, sensory and physical factors enabling driving safety in older adults. *Clin Psychol Rev.* 25(1):45-65.

Anstey KJ, Windsor TD, Luszcz MA, Andrews GR. (2006) Predicting driving cessation over 5 years in older adults: psychological well-being and cognitive competence are stronger predictors than physical health. *J Am Geriatr Soc.*;54(1):121-6.

Ball K., Vance D. Edwards J. & al. Aging and the brain. In: Rizzo M. Eslinger PJ, eds. *Principles and Practice of Behavioral Neurology and Neuropsychology.* Elsevier, Pennsylvania, 2004, pp. 795-809.

Biecheler M.B., Fontaine H. & Got C. Alcool et circulation routière. L'alcool à chiffres ouverts, consommations et conséquences : indicateurs en France. Éditions SeliArslan, Paris, 1997, pp. 235–275.

Brooks B.M., Attree E.A., Rose F.D., Clifford B.R. & Leadbetter A.G. (1997). The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory.* 7: 65-78.

Burgess N. (2006). Spatial memory: how egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences.* 10(12):551-7.

Burns P.C. (1999). Navigation and mobility of older drivers. *J Gerontol Social Sci.* 54B:S49–55.

Carassa A., Geminiani G., Morganti F. & Varotto D. (2002). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment : the effect of the efficient exploration. *Cogn Process Int Quart CognSci.* 3-4:65-81.

Chalfonte B.L. & Johnson M.K. (1996). Feature memory and binding in young and older adults. *Memory Cogn.* 24:403-16.

Chaparro A, Wood JM, Carberry T. (2005) Effects of age and auditory and visual dual tasks on closed-road driving performance. *Optom Vis Sci.* 82(8):747-54.

Choi M, Lohman MC, Mezuk B. (2013) Trajectories of cognitive decline by driving mobility: evidence from the Health and Retirement Study. *Int J Geriatr Psychiatry*.

Fontaine H. (2003). Driver age and road traffic accidents What is the risk for seniors? *Recherche Transports Sécurité*. 79:107–120.

Fontaine H. & Gourlet, Y. (1991). L'insécurité routière des personnes âgées. *Transports*. 350:390–395.

Gramann K., Müller H.J., Schönebeck B. & Debus G. (2006). The neural basis of ego- and allocentric reference frames in spatial navigation: evidence from spatio-temporal coupled current density reconstruction. *Brain Research*. 1118(1):116-29.

Guerrier J.H., Manivannan P. & Nair S. (1999). The role of working memory, field dependence, visual search, and reaction time in the left turn performance of older female drivers. *Appl. Ergon*. 30:109–119.

Kessels R., Hobbel D. & Postma A. (2007). Aging, context memory and binding : a comparison of “what, where and when” in young and older adults. *Int J Neurosci*. 117:795-810.

Kessels R., Te Boekhorst S. & Postma A. (2005). The contribution of implicit and explicit memory to the effects of errorless learning : a comparison between young and older adults. *J Int Neuropsychol Soc*. 11:144-151.

Kotecha A., Spratt A. & Viswanathan A. (2008). Visual function and fitness to drive. *Br Med Bull*. 87:163-174.

Kowalski K, Love J, Tuokko H, MacDonald S, Hultsch D, Strauss E. (2012) The influence of cognitive impairment with no dementia on driving restriction and cessation in older adults. *Accid Anal Prev*.;49:308-15.

Krampe RT, Rapp MA, Bondar A, Baltes PB. (2003) Allocation of cognitive resources during the simultaneous performance of cognitive and sensorimotor tasks. *Nervenarzt*.;74(3):211-8.

Li G., Braver E.R. & Chen L.H. (2003). Fragility versus excessive crash involvement as determinants of high death rates per vehicle-mile of travel among older drivers. *Accid Anal Prev.* 35, 227–235.

Lyman S., Ferguson S.A., Braver E.R. & Williams, A.F. (2002). Older driver involvements in police reported crashes and fatal crashes: trends and projections. *InjPrev.* 8:116–120.

Marmeleira J.F., Godinho M.B. & Fernandes O.M. (2009). The effects of an exercise program on several abilities associated with driving performance in older adults. *Accid Anal Prev.* 41(1):90-97.

McGwin G., Sims R.V., Pulley L. & Roseman J.M. (2000). Relations among chronic medical conditions, medications, and automobile crashes in the elderly: a population-based case-control study. *Am J Epidemiol.* 152(5):424–431.

Moffat S.D., Elkins W. & Resnick S.M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging.* 27(7):965-972.

Moffat S.D., Kennedy K.M., Rodrigue K.M. & Raz N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex.* 17(6):1274-1282.

Moffat S.D., Zonderman A.B. & Resnick S.M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *NeurobiolAging.* 22:787–796.

Mormino E.C., Kluth J.T., Madison C.M., Rabinovici G.D., Baker S.L., Miller B.L., Koeppe R.A., Mathis C.A., Weiner M.W. & Jagust W.J. (2009). Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. Episodic memory loss is related to hippocampal-mediated beta-amyloid deposition in elderly subjects. *Brain.* 132(Pt 5):1310-1323.

Naveh-Benjamin M. (1990). Coding of temporal order information : an automatic process? *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 16:117-126.

Neill W.T., Beck J.L., Bottalico K.S. & Molloy R.D. (1990). Effects of intentional versus incidental learning on explicit and implicit tests of memory. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 16:457-463.

Plancher G., Nicolas S. & Piolino P. (2008). Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: study in aging. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*. 6(1):7-22.

Porter MM, Whitton MJ. (2002) Assessment of driving with the global positioning system and video technology in young, middle-aged, and older drivers. *J Gerontol A BiolSci Med Sci*. 57(9):M578-82.

Preusser D.F., Williams A.F., Ferguson S.A., Ulmer R.G. & Weinstein H.B (1998). Fatal crash risk for older drivers at intersections. *Accid Anal Prev*. 30:151–159.

Raz N., Gunning-Dixon F., Head D., Rodrigue K.M., Williamson A. & Acker J. D. (2004). Regional volumetry of the cerebral cortex in normal adults: differential aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry. *Neurobiology of Aging*. 25(3):377-396.

Reger M.A., Welsh R.K., Watson G.S., Cholerton B., Baker L.D. & Craft S. (2004). The relationship between neuropsychological functioning and driving ability in dementia: a meta-analysis. *Neuropsychology*. 18(1):85-93.

Robert-Bobée I. (2007). Projections de population 2005-2050. Vieillesse de la population en France métropolitaine. *Economie et Statistiques*. 408-409:95-112.

Shapiro M.L., Kennedy P.J. & Ferbinteanu J. (2006). Representing episodes in the mammalian brain. *Curr Opin Neurobiol*. 16(6):701-709.

Spiriduso W.W., Francis K.L. & MacRae P.G. *Physical Dimensions of Aging* (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics, 2005.

Tohno Y., Tohno S., Ongkana N., Suwannahoy P., Azuma C., Minami T. & Mahakkanukrauh P. (2010). Age-Related Changes of Elements and Relationships Among Elements in Human Hippocampus, Dentate Gyrus, and Fornix. *Biol Trace Elem Res*.

Tulving E. (2002). Episodic memory : from mind to brain. *Ann Rev Psychol*. 53:1-25.

Van Elslande P. (2003). Les erreurs des conducteurs âgés. *Recherche Transport Sécurité*. 80:190-202.

West S.K., Hahn D.V., Baldwin K.C., Duncan D.D., Munoz B.E., Turano K.A., Hassan S.E., Munro C.A. & Bandeen-Roche K. (2010). Older drivers and failure to stop at red lights. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 65(2):179-183.

Wheatley C.J. & Di Stefano M. (2008). Individualized assessment of driving fitness for older individuals with health, disability, and age-related concerns. *Traffic Inj Prev.* 9(4):320-327.

Woollett K. & Maguire E.A. (2009). Navigational expertise may compromise anterograde associative memory. *Neuropsychologia.* 47(4):1088-1095

Ystad M.A., Lundervold A.J., Wehling E., Espeseth T., Rootwelt H., Westlye L.T., Andersson M., Adolfsdottir S., Geitung J.T., Fjell A.M., Reinvang I. & Lundervold A. (2009). Hippocampal volumes are important predictors for memory function in elderly women. *BMC Med Imaging.* 22;9:17.