

Université de Montréal

**Étude exploratoire des effets du vieillissement normal lors de tâches
réalisées dans un environnement virtuel**

par
Edith Massicotte

Département de Psychologie
Faculté des Arts et des Sciences

Essai doctoral d'intégration présenté
en vue de l'obtention du grade de
Doctorat en psychologie, option neuropsychologie clinique (D.Psy.)

18 Août 2017

© Edith Massicotte, 2017

Résumé

Les évaluations neuropsychologiques peuvent mettre en évidence les changements cognitifs qui s'opèrent lors du vieillissement normal, notamment sur le plan des fonctions exécutives. Or, la réalité virtuelle (RV) semble aussi intéressante pour l'évaluation grâce à sa plus grande sensibilité et sa validité écologique. L'objectif de cette recherche est de comprendre de quelle façon la réalisation de tâches en RV peut affecter les performances et la charge cognitive des participants âgés, en raison de la nécessité à négocier avec les technologies. Nous avons comparé les performances de 14 adultes jeunes et 11 âgés normaux à des épreuves traditionnelles des fonctions exécutives et dans le *Virtual Multitasking Test-2* (VMT-2), un appartement tridimensionnel dans lequel des tâches similaires au quotidien devaient être réalisées.

Les analyses descriptives n'ont montré aucune différence de groupes sur plusieurs variables: scolarité, états de dépression et d'anxiété ou statut cognitif (*Montreal Cognitive Assessment*; MoCA). Les âgés ont obtenu des performances inférieures aux tests traditionnels (*Color-Word Interference Test* (CWIT); *Trail Making Test* (TMT); *Zoo Map Test*), avaient besoin de plus de temps dans le VMT-2, ont complété un nombre inférieur de tâches et ont rapporté être davantage surchargé cognitivement que les jeunes. Les analyses corrélationnelles ont révélé que l'exécution des tâches sollicitait la vitesse de traitement de l'information, le balayage visuel, la flexibilité cognitive et la planification. Nous suggérons que les divergences de performances entre les groupes dans le VMT-2 soient liées à l'âge et à une plus grande difficulté chez les aînés à interagir avec l'environnement virtuel (EV).

Mots-clés : réalité virtuelle, vieillissement normal, fonctions cognitives, fonctions exécutives, charge cognitive, charge mentale, neuropsychologie clinique

Abstract

Neuropsychological assessments can reveal cognitive changes in normal aging, most notably in the executive system. Moreover, virtual reality seems interesting to observe these changes due to its higher sensitivity and ecological validity. This study aims to understand how virtual tasks can affect both the cognitive workload and performances of elderly subjects, while considering their aptitude with technology. We compared performances of 14 young adults and 11 healthy elderly on standard neuropsychological tests of executive functions and on the Virtual Multitasking Test-2 (VMT-2), a 3D virtual apartment where the subjects must complete tasks similar to those done in everyday life.

Descriptive analyses indicated there were no differences among the groups on many variables, such as: scholarship, state of depression and anxiety or cognitive status (Montreal Cognitive Assessment; MoCA). However, elderly subjects performed worse on standard tests (Color-Word Interference Test, Trail Making Test, Zoo Map Test), required more time in the VMT-2, completed less tasks, and reported being more cognitively overloaded as compared to younger ones. Correlation analyses revealed that to execute tasks in the VMT-2, one required processing speed, visual scanning, cognitive flexibility and action planning. We suggest that the difference in performances between the groups in the VMT-2 are related to aging and to the greater difficulties that the elderly experienced when interacting with the virtual environment.

Keywords : virtual reality, healthy aging, cognitive functions, executive functions, cognitive workload, mental workload, clinical neuropsychology

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des abréviations.....	vii
Remerciements.....	viii
Avant-propos.....	ix
Contexte théorique.....	1
Objectif général.....	9
Objectifs spécifiques.....	9
Hypothèses spécifiques.....	10
Méthode.....	11
Participants.....	11
Déroulement.....	12
Mesures de contrôle.....	12
Instruments de mesure.....	14
Environnement virtuel et matériel.....	17
Protocole expérimental : le <i>Virtual Multitasking Test-2</i> (VMT-2).....	18
Phase de familiarisation.....	18
Phase d'expérimentation.....	18
Description des analyses statistiques.....	20
Résultats.....	21
Performances aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles.....	22
Performances dans l'environnement virtuel.....	24
Questionnaire sur la charge cognitive.....	24
Réalisation des tâches dans la réalité virtuelle.....	25

Discussion.....	27
Forces et limites	36
Conclusion	39
Références.....	41

Liste des tableaux

Tableau I. <i>Moyennes et écarts-types en regard des mesures de contrôle pré et post-expérimentation</i>	21
Tableau II. <i>Statistiques descriptives des performances aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles et niveau de signification de l'analyse de variance</i>	23
Tableau III. <i>Statistiques descriptives des variables issues de la réalité virtuelle et niveau de signification de l'analyse de variance</i>	24

Liste des figures

Figure 1. Séquence des tâches générées par le Virtual Multitasking Test-2	20
---	----

Liste des abréviations

AIVQ : Activités instrumentales de la vie quotidienne
ANOVA : Analyse de variance
BADS : Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome
BDI : Beck Depression Inventory
BOLD : Blood Oxygenation Level Dependent
CWIT : Color-Word Interference Test
DEX : Dysexecutive Questionnaire
D-KEFS : Delis-Kaplan Executive Function System
EV : Environnement virtuel
NASA-TLX : NASA-Task Load Index
RV : Réalité virtuelle
STAI : State-Trait Anxiety Inventory
TMT : Trail Making Test
TNC : Trouble neurocognitif
VMT-2 : Virtual Multitasking Test-2

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Frédéric. Au tout début de notre collaboration, tu as démontré un souci sincère de mettre sur pied un projet qui rejoignait mes intérêts. Ceci a été le premier signe démontrant le directeur à l'écoute que tu es et la place privilégiée que tu accordes à l'étudiante dans le processus de recherche. Ton soutien, ton écoute et ta pédagogie ont été grandement appréciés.

Merci à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, m'ont supportée dans mes études au cours des dernières années. Un merci tout spécial à mes collègues, en qui j'ai trouvé de véritables amies : vous avez rendu les moments difficiles passagers, les moments de découragement surmontables et les moments de joie mémorables.

Un grand merci à Sabrina pour sa précieuse collaboration au projet, de même qu'aux bénévoles, Coralie et Kathleen. Enfin, je tiens à remercier sincèrement tous les participants qui ont rendu cette étude possible.

Avant-propos

Le vieillissement mondial de la population amène des défis majeurs dans le domaine de la santé, considérant l'expansion des troubles neurocognitifs chez les aînés, dont celui dû à la maladie d'Alzheimer. Dans l'optique d'une meilleure gestion de ce « fléau », l'*Alzheimer's Disease International* (Prince et al., 2015) souligne l'importance de relever les défis du diagnostic précoce et de s'intéresser au devenir à long terme des personnes sur le plan de l'autonomie fonctionnelle. Alors que les épreuves neuropsychologiques traditionnelles sont généralement employées afin de statuer sur l'intégrité des fonctions cognitives, l'évolution de la technologie offre un tout nouveau pan d'évaluations écologiques en permettant de recréer des environnements similaires à la vie quotidienne, où l'accomplissement des tâches dans ces environnements virtuels devient la mesure du fonctionnement cognitif d'un point de vue fonctionnel.

Avant de pouvoir utiliser les avancées technologiques auprès d'une population souffrant d'atteintes cognitives importantes, des études doivent être conduites pour en vérifier la faisabilité auprès de la population âgée saine. C'est en ce sens que le présent projet de recherche a été développé : il vise principalement à comprendre comment la réalisation d'une tâche en réalité virtuelle peut affecter les performances et la charge cognitive de participants âgés en raison de la nécessité à négocier avec les technologies de l'informatique, dont les interfaces personne-machine.

Contexte théorique

Selon les prévisions de l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2016), en 2050, la proportion de personnes âgées de 60 ans et plus devrait atteindre 30% dans de nombreux pays, dont le Canada. Parmi ces personnes, certaines développeront des maladies de nature physique, psychologique ou neurologique. C'est ainsi que, selon les prévisions, les troubles neurocognitifs (TNC) majeurs toucheront approximativement 132 millions d'individus (OMS, 2017), engendrant par le fait même des coûts sociétaux faramineux (Prince et al., 2015). La définition même de ces troubles inclut une perte de l'autonomie fonctionnelle qui réduit inévitablement la qualité de vie des individus atteints (Giebel et al., 2014; Lau, Parikh, Harvey, Huang et Farias, 2015). Cette perte d'autonomie occasionne une charge importante aux proches aidants (Reppermund et al., 2013; Marshall et al., 2011) et contribue à l'institutionnalisation (Marshall et al., 2011) des personnes atteintes. Devant l'ampleur de ce phénomène, plusieurs chercheurs et cliniciens s'entendent sur l'importance de développer des moyens d'évaluation sensibles, de même que des interventions préventives face à l'apparition des TNC, à défaut d'avoir accès à des moyens curatifs. Pour ce faire, il convient de caractériser, entre autres à l'aide des nouvelles technologies, les changements cognitifs dans le vieillissement normal et leurs particularités dans le fonctionnement quotidien, tout en tenant compte de l'hétérogénéité des profils cognitifs qui s'accroît avec l'âge (Ardila, 2007). Ultiment, une telle caractérisation permettrait d'identifier les individus sains à risque de développer un trouble ou en début de maladie.

La littérature portant sur les modifications cognitives survenant avec l'âge cible notamment le déclin de certaines composantes attentionnelles (Fortenbaugh et al. 2015) et mnésiques (Koen et Yonelinas, 2014; Salthouse, 2010). La vitesse de traitement de l'information diminuerait également (Thomson et Hasher, 2017; Salthouse, 2012; Bugg, Zook, DeLosh, Davalos et Davis,

2006). Borghesani et al. (2013) ont réalisé une étude auprès de 165 individus âgés en moyenne de 66,9 ans et ont également démontré que l'avancement en âge était relié à une diminution de la vitesse de traitement de l'information. Conséquemment, cela aurait des répercussions dans le quotidien. En effet, les personnes âgées prendraient plus de temps pour réaliser les activités instrumentales de la vie quotidienne (AIVQ) (Owsley, Sloane, McGwin et Ball, 2002), incluant des activités telles que logger un appel téléphonique à quelqu'un et préparer un repas (Lawton et Brody, 1996).

Par ailleurs, les fonctions exécutives, qui incluent « un ensemble de processus cognitifs dits de haut niveau dont la fonction essentielle est de garantir l'adaptation du sujet aux situations nouvelles et/ou complexes » (Meulemans, 2006, p.2), seraient également altérées dans le vieillissement normal (Harada, Love et Triebel, 2013; Etienne, Marin-Lamellet et Laurent, 2008; Butler et Zacks, 2006; Collette et Salmon, 2014; Ska et Joannette, 2006), plus spécifiquement après l'âge de 60 ans (Treitz, Heyder et Daum, 2007). L'inhibition, la flexibilité cognitive et la planification, des processus considérés comme faisant partie du fonctionnement exécutif (Meulemans, 2006; Chan, Shum, Toulopoulou et Chen, 2008), déclineraient avec l'âge. Une étude récente réalisée par Adólfssdóttir, Wollschlaeger, Wehling et Lundervold (2017) a effectivement démontré un déclin de l'inhibition et de la flexibilité cognitive avec l'avancement en âge. L'atteinte des capacités de planification chez les personnes âgées a également été mise en évidence dans certaines études (Sorel et Pennequin, 2008; Allain et al., 2005).

Par ailleurs, la mémoire prospective, définie comme la capacité de retenir une intention à effectuer dans le futur (Ellis, 1996), serait également altérée chez les personnes âgées (West et Covell, 2001; West, Jakubek et Wymbs, 2002; Salthouse, Berish et Siedlecki, 2004). Une étude réalisée par Martin, Kliegel et McDaniel (2003), auprès de jeunes adultes et d'aînés, suggère

des liens étroits entre le fonctionnement exécutif et la mémoire prospective, où le déclin exécutif affecterait les capacités à rappeler une intention dans le futur. L'altération de cette fonction serait liée à un impact fonctionnel, de par le rôle qu'elle occuperait dans les activités quotidiennes (Kliegel, Eschan et Thöne-Otto, 2004).

Bien que l'intégrité de fonctions cognitives telles que la vitesse de traitement de l'information et la mémoire prospective s'avère importante pour fonctionner de façon optimale au quotidien, les conclusions de Royall et al. (2007) ont mis en lumière l'implication prédominante des fonctions exécutives dans la réalisation des AIVQ chez les adultes et les personnes âgées. Les conclusions de la revue systématique réalisée par Overdorp, Kessels, Claassen et Oosterman (2016) portant sur les effets des déficits neuropsychologiques et neuropathologiques sur les AIVQ chez la clientèle âgée vont également en ce sens. Plus spécifiquement, le rôle des fonctions exécutives dans les activités du quotidien consisterait à réguler et à moduler les autres fonctions cognitives (Gold, 2012). D'ailleurs, en l'absence de dysfonctions cognitives autres qu'exécutives, Gold (2012) soutient qu'il pourrait être impossible de compléter des AIVQ de manière autonome. Les fonctions exécutives représentent ainsi un objet de recherche important dans le contexte du vieillissement normal, considérant leur importance dans la réalisation des activités quotidiennes et leur détérioration chez la population vieillissante.

Or, les tests neuropsychologiques traditionnels ont des limites quant à leur capacité de mettre en lien le fonctionnement cognitif et quotidien. Sur le plan psychométrique, il apparaît plus facile de prédire le fonctionnement d'une personne dans la vie quotidienne lorsque l'instrument utilisé détient une bonne validité écologique (Nolin, Banville, Cloutier et Allain, 2013), c'est-à-dire lorsqu'il propose des tâches réalistes, naturelles et plausibles en regard du

quotidien et dont les rétroactions ne sont pas immédiates, comme dans la vraie vie. La réalité virtuelle (RV) est apparue comme une alternative intéressante pour la réalisation d'évaluations écologiques de type vérisimilaire, soit des évaluations qui offrent la possibilité de reproduire des performances telles que retrouvées dans la vie quotidienne. La RV, quant à elle, a été définie par Pratt, Zyda et Kelleher (1975) comme étant l'utilisation d'un environnement simulé par ordinateur dans lequel la personne entre en interaction, en temps réel, avec divers objets présents dans ledit environnement virtuel (EV).

Les EV dans lesquels la personne est en immersion, via un visiocasque, sont donc de plus en plus reconnus pour leur validité écologique (Parsons, Silva, Pair et Rizzo, 2008; Flynn et al., 2003). C'est ce qui explique pourquoi la RV est maintenant utilisée dans l'évaluation de différents processus cognitifs (Caffò et al., 2012; Tarnanas, Schlee, Tsolaki, Müri, Mosimann et Nef, 2013; Zucchella et al., 2014). Plusieurs écrits scientifiques soutiennent l'utilisation de la RV pour l'évaluation neuropsychologique en raison de la sensibilité avec laquelle elle peut mettre en évidence des déficits cognitifs (Climent-Martinez et al., 2014 ; Negut, Matu, Sava et David, 2016 ; Tarnanas et al., 2015; Zhang et al., 2001), et ce, chez des individus de tous âges présentant diverses problématiques (Banville, Nolin, Verhulst, Rosinvil et Allain, sous presses). L'utilisation de la RV représente certes un plus grand défi pour les personnes avancées en âge n'ayant pas de TNC (Banville et al., 2017; Massicotte, Lussier, Verhulst et Banville, 2017; Verhulst et al., 2017) pour plusieurs raisons, dont certaines sont liées à l'utilisation des technologies de l'informatique. Des auteurs soutiennent tout de même sa pertinence auprès de cette population (Chen et Or, 2017) et même auprès d'individus souffrant d'un TNC majeur (Flynn et al., 2003).

Malgré un nombre croissant d'études visant l'évaluation du fonctionnement cognitif par la RV, le concept de charge cognitive a été très peu étudié, alors qu'il constitue pourtant un élément central dans ce type de recherche en raison de la nécessité de partager l'attention entre une tâche cognitive et la manipulation du matériel qui permet l'interaction avec l'EV et donc, la réalisation de ladite tâche. La charge cognitive représente l'effort cognitif ou mental déployé lors de la réalisation d'une tâche (Kahneman, 1973) et implique l'hypothèse suggérant que les individus possèdent des ressources cognitives limitées (Kahneman, 1973; Sweller, 1994), à l'instar des processus attentionnels. Lorsque celles-ci s'épuisent et que la charge cognitive devient trop importante, une diminution de la performance pourrait être observée (Kahneman, 1973; Chemloul & Banville, 2016; DiDomenico et Nussbaum, 2011) en fonction des caractéristiques individuelles (Chanquoy, Tricot et Sweller, 2007). Ces dernières correspondraient aux ressources cognitives dont un individu dispose pour performer et semblent être altérées avec l'avancement en âge. Par ailleurs, la charge cognitive dépendrait aussi de caractéristiques propres à la tâche et à l'environnement (Chanquoy, Tricot et Sweller, 2007) : les caractéristiques de la tâche correspondraient au niveau de difficulté ou d'exigence de la tâche (exigeante versus non exigeante), alors que celles liées à l'environnement concernent les distracteurs qui ne seraient pas en lien avec la tâche, mais qui seraient susceptibles d'interférer avec son accomplissement. Par conséquent, il est essentiel de documenter ce phénomène lorsque les tâches cognitives sont réalisées par le biais d'une interaction avec un EV, car ce dernier possède des caractéristiques susceptibles d'accroître la charge cognitive chez un individu, particulièrement s'il n'est pas familier avec la technologie ou les jeux vidéo (Ang, Zaphiris et Mahmood, 2006).

Tel que mentionné précédemment, peu d'auteurs ont cherché à démontrer comment la charge mentale générée par les interfaces personne-machine peut influencer le rendement à des tâches cognitives de type vérisimilaire réalisées dans un EV. Tomasko, Pauli, Kunselman et Haluck (2012) ont investigué les effets de la privation de sommeil sur les habiletés chirurgicales. Ils ont démontré que les individus ayant dormi moins de deux heures parvenaient à effectuer une tâche chirurgicale simulée dans un EV et à en apprendre une nouvelle, au même titre que des individus ayant dormi au moins six heures, mais au prix d'une charge cognitive significativement plus grande. À notre connaissance, le concept de charge cognitive n'a toutefois pas été investigué dans le domaine de la neuropsychologie, bien que des réflexions portant sur l'influence des interfaces personne-machine sur la cognition émergent dans les écrits scientifiques (Allain et al., 2014; Banville et al., sous presse; Banville et al., 2017, Verhulst et al., 2017). Ces écrits suggèrent que l'interaction avec l'EV peut surcharger cognitivement les participants et affecter leurs performances.

En ce sens, une étude récente de Besançon, Issartel, Ammi et Isenberg (2016) a comparé la charge cognitive consécutive à l'utilisation d'une souris, d'un écran tactile et d'un objet tangible qui permet d'effectuer des manipulations dans un EV (*tangible input*). Les résultats ont démontré que la technique d'interaction générant la moins grande charge cognitive était la souris, tout en permettant des manipulations d'une aussi grande précision que les autres techniques dans l'EV. Une étude de Verhulst, Richard, Richard, Allain et Nolin (2016) s'est intéressée à explorer la charge cognitive liée à l'utilisation d'une technique sollicitant l'ensemble du corps pour se mouvoir (Kinect) dans un EV en comparaison à une manette de jeux (*gamepad*). Même si l'utilisation de la Kinect est davantage intuitive, son utilisation requiert la mobilisation d'efforts importants menant à davantage de fatigue. Conséquemment,

les données actuellement disponibles dans la littérature semblent justifier l'importance d'investiguer la charge cognitive dans les études de RV, tout en s'assurant de proposer un équilibre entre un degré élevé de vérisimilitude de la tâche et la simplicité d'utilisation des techniques d'interaction.

Ranchet, Morgan, Akinwuntan et Devos (2017) ont réalisé une revue systématique ayant pour sujet la charge cognitive dans le vieillissement normal et pathologique, évaluée par des mesures objectives, telles que l'électroencéphalogramme, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et la pupillométrie. Les informations que fournissent ces mesures peuvent alors être utilisées afin d'examiner s'il existe des différences entre les individus jeunes et âgés sur la charge mentale lors de tâches cognitives. Lors de l'utilisation de l'électroencéphalogramme, les variations de la charge cognitive des individus peuvent être mises en évidence par un changement des ondes cérébrales (p. ex., une augmentation des ondes thêta au niveau frontal; Gazzaley et al., 2008). Dans le cas de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, le signal BOLD (*blood-oxygen-level-dependent*) rend compte d'une augmentation de la charge cognitive en identifiant les variations locales et transitoires de la quantité d'oxygène transportée par l'hémoglobine en fonction de l'activité neuronale du cerveau (p. ex., une augmentation de l'activité au niveau préfrontal; Cappell et al., 2010). Enfin, la dilatation de la pupille est également un indicateur de la charge cognitive et peut être mesurée par un « *eye tracker* » (p. ex., une augmentation de la dilatation suggérerait une charge cognitive plus élevée; Piquado et al., 2010). En fonction des résultats des études recensées par Ranchet et al. (2017), les auteurs ont conclu que la charge cognitive des personnes âgées saines est plus élevée que celle des personnes plus jeunes lors de tâches cognitives traditionnelles et que cela est retrouvé de façon consistante à travers les études. Ceci s'expliquerait par le fait que les aînés auraient des

ressources cognitives plus limitées, et que, s'épuisant plus facilement, leur charge cognitive augmenterait.

Bien que les mesures physiologiques utilisées pour quantifier la charge cognitive aient l'avantage d'être objectives, en continu et qu'elles s'avèrent être sensibles pour déceler les variations (Ranchet et al., 2017), elles comprennent certaines limites. Tout d'abord, il peut être difficile, voire impossible, de les intégrer aux équipements de RV. De plus, le recours à des mesures physiologiques est susceptible de causer de la distraction et d'engendrer du stress, pouvant par le fait même augmenter inutilement la charge cognitive des individus et influencer leurs performances dans l'EV. D'autres mesures, moins intrusives ou distrayantes, dans la lignée des échelles subjectives, peuvent aussi être indiquées, car elles sont faciles d'utilisation, en plus d'être valides et fiables sur le plan psychométrique. Ces échelles permettent ainsi de documenter la charge cognitive perçue par les individus à travers plusieurs dimensions. C'est le cas du *NASA-Task Load Index* (NASA-TLX; Hart et Staveland, 1988), un questionnaire auto rapporté, reconnu comme un « *Gold Standard* » en recherche, à partir duquel la personne doit attribuer un score sur une échelle visuelle analogue. Ce questionnaire est divisé en trois sections, dont la première comprend les dimensions associées à la tâche, c'est-à-dire l'exigence mentale, physique et temporelle perçue par la personne à la suite de sa réalisation. La seconde inclut les dimensions associées aux stratégies employées, qui comprennent l'appréciation du participant face à sa performance ainsi que l'effort qu'il a dû déployer. Enfin, la troisième est la dimension spécifique au participant et elle rend compte du niveau de frustration ressenti au cours de la tâche.

Objectif général

Le principal objectif de cette recherche est de comprendre de quelle façon la réalisation d'une tâche en RV, sollicitant les fonctions exécutives, peut affecter la performance ainsi que la charge cognitive de participants âgés, en raison de la nécessité à négocier avec les technologies de l'informatique. Pour ce faire, nous avons utilisé le *Virtual Multitasking Test-2* (VMT-2; Banville, Forget, Bouchard, Page et Nolin, 2013), un appartement tridimensionnel de six pièces et demi dans lequel des tâches ressemblant à celles de la vie quotidienne sont proposées (p. ex., ranger l'épicerie, répondre au téléphone). La mise en contexte précédant l'immersion consiste à expliquer au participant qu'il est en visite à l'extérieur chez un ami avec qui il ira voir un spectacle en soirée. D'ici le retour du travail de cet ami, il devra accomplir des tâches qui prennent place dans les différentes pièces de l'appartement, tout en répondant adéquatement aux demandes de l'environnement (p. ex., effectuer les nouvelles tâches énoncées au téléphone virtuel après avoir répondu).

Une étude exploratoire de Banville et al. (2013) réalisée avec le VMT-2 auprès de jeunes adultes et d'aînés a démontré que les personnes âgées avaient besoin de plus de temps pour réaliser les tâches que les jeunes et qu'une charge cognitive plus importante était générée. Or, aucun lien n'a été fait entre ces résultats préliminaires et le fonctionnement cognitif des participants objectivé par des tests neuropsychologiques traditionnels. Le présent projet de recherche vise donc notamment à explorer ces liens.

Objectifs spécifiques

Le (1) premier objectif spécifique est d'examiner les performances des participants du groupe « âgé » et celles du groupe « jeune » aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles des fonctions exécutives, ainsi que dans la RV, en regard du nombre de tâches réussies, du temps

total nécessaire pour réaliser les tâches dans l'EV et du temps passé dans chacune des pièces. Le (2) second objectif est d'examiner si des liens existent entre les indices tirés de la RV (temps total passé dans l'EV, temps passé dans chacune des pièces, réussite des tâches) et ceux issus de l'évaluation neuropsychologique traditionnelle des fonctions exécutives. Enfin, le (3) troisième objectif est de comparer la charge cognitive du groupe âgé et du groupe jeune dans le souci d'investiguer comment les interactions avec l'EV peuvent influencer la performance observée lors de la réalisation de tâches reproduisant des activités quotidiennes.

Hypothèses spécifiques

En s'appuyant sur la prémisse que l'âge influence à la baisse le fonctionnement cognitif, la (1) première hypothèse suggère que les performances des participants du groupe âgé seront inférieures à celles des participants du groupe jeune aux épreuves neuropsychologiques. Il est également attendu que le nombre de tâches réussies dans l'EV par le groupe âgé soit inférieur, alors que le temps de réalisation total des tâches dans l'EV de même que dans chacune des pièces soit supérieur. Par ailleurs, (2) les performances dans l'EV solliciteront les fonctions exécutives, ce qui sera mis en évidence par des corrélations entre les indices tirés de la RV et ceux issus de l'évaluation neuropsychologique traditionnelle. Enfin, (3) il est attendu qu'une plus grande charge cognitive soit rapportée par les participants âgés en comparaison aux participants jeunes au terme de la réalisation des tâches dans l'EV.

Méthode

Participants

Dans ce devis quasi expérimental, trente participants ont été recrutés selon un échantillonnage mixte par convenance ainsi que par réseau (c.-à-d. de type *boule de neige*) et divisé en deux groupes sur la base de l'âge : un groupe nommé « âgé », regroupant des participants de 60 à 87 ans, et l'autre nommé « jeune », regroupant des participants de 18 et 45 ans. Pour être inclus dans l'étude, ils devaient obtenir un score égal ou supérieur à 26 au *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA; Nasreddine et al., 2005), ce qui suggère un fonctionnement cognitif normal. De plus, ils ne devaient pas présenter de condition neurologique ou un trouble mental grave (p. ex., schizophrénie, trouble de la personnalité, trouble bipolaire) et ne devaient pas présenter de troubles sensoriels (auditifs et visuels) non corrigés. Ils devaient parler français.

Deux participants (un participant jeune et un participant âgé) ont été éliminés en raison de problèmes techniques (p. ex. interruption de la tâche en raison d'un dysfonctionnement du système informatique) et trois participants (deux du groupe jeune et un du groupe âgé) en raison d'un résultat au MoCA inférieur à vingt-six. Au final, le groupe des personnes âgées était composé de onze participants, dont huit femmes et trois hommes, alors que le groupe des adultes jeunes comprenait quatorze participants, dont onze femmes et trois hommes. Plus de la moitié des personnes âgées vivaient en couple (n=8) ou étaient retraitées (n=7). Approximativement autant de personnes jeunes étaient en couple (n=6) ou célibataire (n=7) et la majorité d'entre eux travaillaient (n=12). Évidemment, une différence significative a été retrouvée entre les groupes sur le plan de l'âge ($F[1,22]=366,70$; $p=0,01$), où les personnes âgées avaient en

moyenne $66,08 \pm 2,90$ ans (min.:63, max.:72) et où les jeunes avaient $26,07 \pm 6,23$ ans (min.:21, max.:43). Le niveau de scolarité des participants des deux groupes était similaire, le nombre d'années moyen d'études correspondant à un niveau universitaire chez les participants jeunes ($M=16,14 \pm 2,48$ ans) et âgés ($M=15,54 \pm 3,11$ ans). Par ailleurs, la majorité des participants ont choisi de retirer le visiocasque et de faire l'expérimentation en mode non immersif en raison de cybermalaises ressentis. Deux participants ont réalisé l'expérimentation en entier avec le visiocasque.

Déroulement

Les participants ont été vus sur une période de trois heures et l'expérimentation s'est déroulée en deux parties. Après avoir consenti à participer à la recherche, un questionnaire maison comprenant notamment des informations sociodémographiques a été rempli et les mesures de contrôle ont été recueillies. Une batterie d'évaluation neuropsychologique (partie A) a été administrée, ainsi que les tâches dans l'appartement virtuel (partie B). Les parties A et B ont été contrebalancées afin d'éviter des effets de fatigue qui auraient pu biaiser les résultats de l'étude. Enfin, il est à noter que cette recherche a obtenu un certificat d'éthique pour la recherche sur les êtres humains délivré par le Comité d'éthique de la recherche en arts et en sciences de l'Université de Montréal (CERAS-2016-17-111-D).

Mesures de contrôle

Le MoCA (Nasreddine et al., 2005) est un test de dépistage du fonctionnement cognitif dont le score total est sur 30 points. Il vise l'évaluation des habiletés visuospatiales et exécutives (sur cinq points), la dénomination (sur trois points), la mémoire (sur cinq points), l'attention (sur six points), le langage (sur trois points), l'abstraction (sur deux points) et l'orientation (sur six points). Un point est ajouté au score total des individus ayant 12 ans ou moins de scolarité. Tel

que mentionné ci-haut, un score total égal ou supérieur à 26 suggère un fonctionnement cognitif normal.

L'épreuve Les 5 mots (Dubois et al., 2002) a été administrée dans le but de s'assurer que les participants jeunes et âgés aient des capacités mnésiques similaires, car une divergence de fonctionnement mnésique serait susceptible d'interférer avec la réalisation des tâches dans l'EV. En effet, avant l'immersion, il est important que les participants se souviennent des tâches à réaliser de même que des consignes en lien avec le fonctionnement de l'EV. Ce test, dont le score maximal est de 20, comprend une phase d'encodage suivi d'un rappel immédiat (10 points) et différé (10 points) : deux points sont alloués par mot rappelé spontanément et un point est alloué pour chacun des mots rappelés à la suite de l'indiçage. Un résultat égal ou inférieur à 18 suggère des difficultés mnésiques et une investigation plus approfondie est suggérée. Ce seuil a obtenu un indice de sensibilité de 83,6% et de spécificité de 84,9% dans la prédiction de la maladie d'Alzheimer (Cowppli-Bony et al., 2005).

Les symptômes dépressifs et anxieux ont également été investigués étant donné l'impact de la dépression (Rock, Roiser, Riedel et Blackwell, 2014) et de l'anxiété (Robinson, Vytal, Cornwell et Grillon, 2013) sur le fonctionnement cognitif. En effet, il a été rapporté que ces troubles de l'humeur peuvent affecter la mémoire, la vitesse de traitement de l'information et le fonctionnement exécutif (McDermott et Ebmeier, 2009). Le *Beck Depression Inventory* (BDI; Beck, Steer et Brown, 1996) a été administré. Il comprend des symptômes liés à la dépression qui doivent être jugés sur une échelle en quatre points. Les deux parties du *State-Trait Anxiety Inventory* (STAI; Spielberger, Gorshu et Lushene, 1970; traduit en français par Gauthier et Bouchard, 1993) évaluant l'état (*A-State*) et les traits anxieux (*A-Trait*) ont été administrés et

comprennent chacun vingt-et-un items auxquels un score doit être attribué selon une échelle en quatre points (1=pas du tout/4=beaucoup).

Par ailleurs, l'aisance à utiliser un ordinateur, jugée par le participant lui-même sur une échelle allant de 0 à 100, a été sondée. Il serait possible que la familiarité avec les ordinateurs puisse influencer la réalisation des tâches dans l'EV, notamment par une meilleure utilisation des périphériques, dont la souris.

Le Questionnaire sur les cybermalaises (Kennedy, Lane, Berbaum et Lilienthal, 1993; traduit en français par Bouchard, Côté et Richard, 2007), administré après la réalisation de la tâche en RV, visait à évaluer la présence de cybermalaises pouvant survenir pendant ou à la suite de l'immersion. Dans l'étude de validation, les auteurs ont trouvé trois dimensions nommées « nausées », « oculomoteur » et « échelle globale » dont les points factoriels sont entre 0,50 et 0,75. Le questionnaire comprend seize items portant sur différentes manifestations (p. ex., mal de tête, difficultés à se concentrer) évalués en importance sur une échelle en quatre points (pas du tout, un peu, modérément, sévèrement). Enfin, le Questionnaire sur le sentiment de présence (Schubert, Friedman et Regenbrecht, 1999; traduit et validé en français par Viaud-Delmon, 2007), également administré en post-immersion, a permis de mesurer le sentiment « d'être réellement présent » dans l'EV, et ce, à travers trois sous-sections (c.-à-d. par la présence spatiale, l'implication et le réalisme graphique de l'EV) dont les réponses sont données à partir d'une échelle de type Likert en cinq points (0=pas du tout/4=beaucoup). L'échelle totale a un niveau de fidélité de 0,85.

Instruments de mesure

Les épreuves neuropsychologiques suivantes ont été utilisées pour décrire le fonctionnement exécutif des participants, ainsi que pour les analyses de validité convergente

des tâches réalisées dans l'EV : les sous-tests *Color-Word Interference Test* (CWIT), *Trail Making Test* (TMT) et *Tower Test* du *Delis-Kaplan Executive Function System* (D-KEFS; Delis, Kaplan et Kramer, 2001), ainsi que le *Zoo Map Test* et le *Dysexecutive Questionnaire* (DEX) du *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome* (BADS; Wilson, Evans, Alderman, Burgess et Emslie, 1997).

Le CWIT comprend quatre conditions, où les participants devaient nommer les couleurs (Condition 1), lire les mots à haute voix (Condition 2) et nommer la couleur de l'encre dans lequel le mot était imprimé et ainsi éviter l'automatisme voulant qu'ils lisent le mot (Condition 3). Enfin, dans la dernière condition, ils devaient alterner entre deux consignes, soit celle de nommer la couleur de l'encre et celle de lire le mot lorsque celui-ci était encadré (Condition 4). Les conditions devaient être exécutées le plus rapidement possible, sans faire d'erreurs. Les variables issues des quatre conditions étaient le temps (en secondes) et le nombre d'erreurs.

En ce qui a trait au TMT, il comporte cinq conditions, dans lesquelles les participants devaient barrer les « 3 » parmi d'autres chiffres (Condition 1), relier les chiffres en ordre croissant (Condition 2), relier les lettres en ordre alphabétique (Condition 3), relier des chiffres (en ordre croissant) et des lettres (en ordre alphabétique) en alternance (Condition 4) et enfin, dessiner un trait sur les pointillés, en s'assurant de bien toucher à chacun des cercles (Condition 5). Les participants devaient travailler le plus rapidement possible, le temps (en secondes) étant la variable utilisée pour les analyses.

Le *Tower Test* consistait à reproduire, à l'aide de disques de différentes grosseurs, des tours tridimensionnelles selon le modèle présenté, en s'assurant d'effectuer un nombre minimal de mouvements. Avant de débiter, les participants étaient informés des deux règles à respecter : (1) ne bouger qu'un seul disque à la fois et (2) ne jamais mettre un grand disque au-dessus d'un

petit disque. Les variables retenues pour les analyses ont été : les points accordés en fonction du nombre de mouvements effectués (*Achievement Score*), le ratio du nombre de mouvements effectués versus le nombre minimal de mouvements requis pour réussir les tours (*Move Accuracy Ratio*) et enfin, le nombre de violations de règles versus le nombre d'items administrés (*Rule-Violations-Per-Item Ratio*).

Par ailleurs, dans le *Zoo Map Test*, les participants devaient planifier dans quel ordre ils visiteraient six des douze endroits sur une carte représentant un zoo, tout en tenant compte de certaines restrictions (p. ex., ne pas emprunter deux fois certains chemins). Les données utilisées pour les analyses ont été le temps total requis pour la tâche, ainsi que le score de planification, qui résultait en la soustraction des erreurs lors de la tâche aux points obtenus pour une séquence de visite adéquate (Score de planification). Quant au DEX, il s'agit un questionnaire d'auto-évaluation constitué de 20 items (traduit en français par Piquard, Derouesne, Meininger et Lacomblez, 2010), où les participants devaient coter la fréquence d'apparition d'un comportement relatif aux fonctions exécutives dans le quotidien (0=jamais/4=très souvent). Le score total a été utilisé pour les analyses.

Un questionnaire visant à évaluer la charge cognitive ressentie lors de la réalisation des tâches dans l'EV a été administré, soit une version française du NASA-TLX (Hart et Staveland, 1988; traduit et validé en français par Cegarra et Morgago, 2009). Tel que mentionné précédemment, ce questionnaire est divisé selon (1) les dimensions associées à la tâche, ce qui comprend les échelles d'exigence mentale, physique et temporelle, selon (2) les dimensions associées aux stratégies, ce qui comprend les échelles de performance et d'effort, et selon (3) la dimension spécifique au participant, comprenant l'échelle de frustration. Les participants devaient faire un trait sur une échelle visuelle analogue non graduée (les extrémités indiquaient

« faible » et « forte » ou « bonne » et « faible ») pour rapporter l'intensité perçue pour chacune des échelles. Les scores de chacune d'elles ont été utilisés pour les analyses, de même que les scores des trois dimensions, représentant l'addition des résultats des échelles les constituant.

Environnement virtuel et matériel

Le VMT, dans sa seconde édition, est un appartement virtuel de 6 pièces ½ implanté dans le moteur de jeu Unity-3D, avec lequel les participants étaient en interaction. L'ordinateur utilisé pour générer les données pendant la réalisation de la tâche était équipé de deux cartes graphiques nVIDIA GeForce 550 permettant d'améliorer la qualité graphique et de réduire les délais de rafraîchissement des images, visant à prévenir la survenue de cybermalaises chez les participants. Le scénario présenté était réalisé en mode immersif, par l'intermédiaire du visiocasque Oculus DK2, qui était branché à un ordinateur PC utilisant le système d'exploitation Windows 7. Les participants étaient libres de retirer le visiocasque en cas de malaise et de faire l'expérimentation en mode non immersif.

Afin de favoriser l'immersion et permettre aux participants de bien entendre ce qui se passait dans l'EV, ils portaient des écouteurs extra-auriculaires. Notons qu'aucun problème d'audition n'était rapporté par les participants des deux groupes. Les déplacements dans l'environnement étaient effectués grâce à une souris et un clavier. Les données recueillies par le système ont été emmagasinées sur le disque dur de l'ordinateur sous forme de logs en format texte (.txt). Le temps pris pour réaliser les tâches dans chacune des pièces de l'appartement virtuel a été utilisé pour les analyses, de même que le temps total de réalisation (en minutes). Aussi, la réussite (1 point) ou l'échec (0 point) de chacune des tâches a été utilisé dans les analyses, en plus d'un score total pour l'ensemble des tâches, correspondant à l'addition des points obtenus.

Protocole expérimental : le *Virtual Multitasking Test-2* (VMT-2)

Phase de familiarisation

Le participant se familiarisait avec le VMT-2 afin de faire l'apprentissage de la topographie des lieux et de faciliter sa navigation dans l'EV lors de l'expérimentation. Dans un premier temps, l'évaluateur présentait les pièces de l'appartement virtuel au participant. Ensuite, il expliquait le mode de fonctionnement des équipements : visiocasque, souris et touches du clavier. Le participant était ensuite invité à se familiariser à l'immersion avec les équipements pendant que l'évaluateur le guidait à travers l'environnement, puis lui demandait de réaliser diverses tâches, telles que saisir des objets, ouvrir et fermer des portes et activer la minuterie de la sècheuse. Enfin, la familiarité du participant avec le VMT-2 était évaluée subjectivement par sa capacité à utiliser adéquatement le clavier et la souris afin de se diriger dans chacune des pièces et à effectuer les actions demandées par l'expérimentateur. Lorsqu'il se sentait confortable avec l'EV et qu'il y naviguait correctement, il était considéré comme étant prêt (c.-à-d. suffisamment familier) pour la seconde phase.

Phase d'expérimentation

Au moment de réaliser les tâches dans l'EV, l'évaluateur a mis en contexte le participant en expliquant qu'il était en visite à l'extérieur pour voir un spectacle et qu'il logeait chez un ami. Ce dernier était actuellement au travail, mais viendrait le rejoindre en soirée pour assister au spectacle avec lui. Les trois consignes spécifiques du VMT-2 étaient alors présentées : (1) répondre au téléphone s'il sonne, (2) ranger le contenu de l'épicerie, car certains articles doivent être rangés rapidement et (3) refermer la porte de la chambre des maîtres à chaque sortie pour éviter que le chien ne monte sur le lit. Ces consignes étaient écrites sur une feuille mise à

disposition des participants. Après qu'elles aient été présentées, les participants devaient les rappeler de mémoire ou les lire avant de débiter l'immersion.

Le VMT-2 respecte une séquence temporelle précise des tâches, des imprévus (orage) et des interférences (télévision ouverte) auxquels le participant est exposé. Tel que présenté à la Figure 1 (p.20), au temps 0, le participant recevait un premier appel : il lui était demandé de nourrir le poisson de son ami et de mettre une chemise dans la sècheuse. À 2 minutes, il recevait un second appel lui demandant de faxer un document dans 10 minutes. À 10 minutes, le participant entendait un orage éclater, ce qui provoquait des dégâts dans la salle à manger et dans la chambre d'amis : il pouvait ainsi choisir d'aller fermer la fenêtre pour réduire les dégâts ou poursuivre ce qu'il faisait. À 15 minutes, il recevait un troisième appel lui demandant de vérifier si les billets de spectacle étaient sur la table basse du salon. Tout au long de l'immersion, le participant devait s'ajuster aux demandes de l'environnement, tout en respectant les règles énoncées avant la tâche, notamment celle concernant la fermeture de la porte de la chambre des maîtres à chaque fois qu'il en sortait.

Les tâches générées par le VMT-2 ont pour objectif d'évaluer les fonctions exécutives, ce qui inclut les capacités à gérer de multiples tâches qui se superposent en faisant preuve de flexibilité, d'inhibition et de planification. Quant à la tâche voulant que le participant ferme la porte de la chambre des maîtres, elle vise plus spécifiquement l'évaluation de la mémoire prospective.

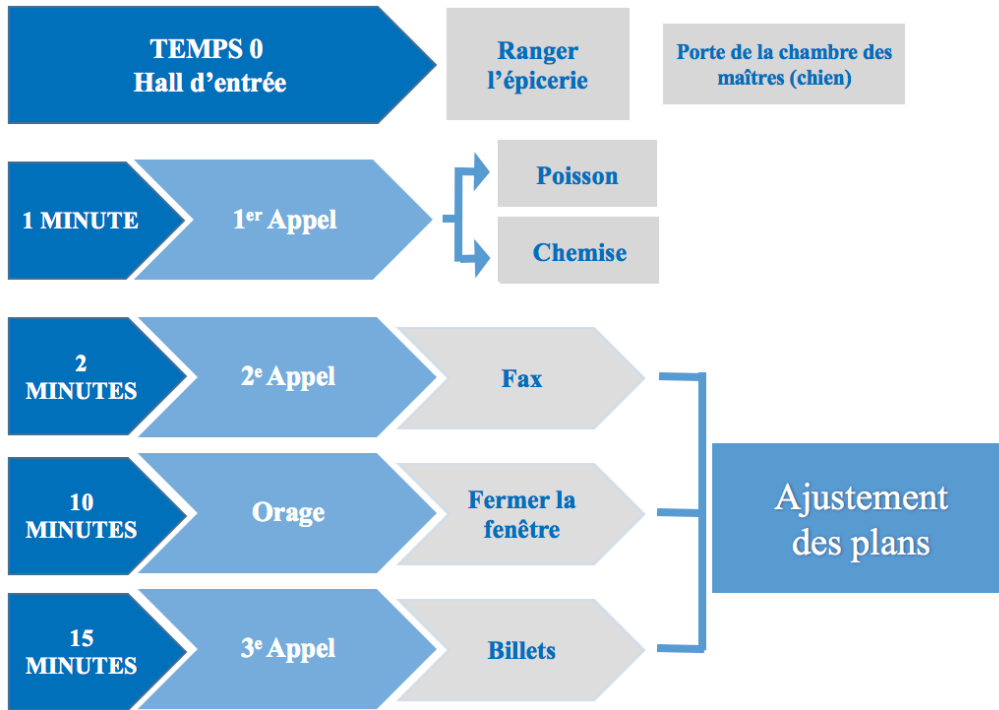


Figure 1. Séquence des tâches générées par le *Virtual Multitasking Test-2*

Description des analyses statistiques

Les données étant distribuées normalement pour chacune des variables dépendantes, des analyses paramétriques ont été conduites à l'aide du logiciel d'analyse statistique SPSS (version 24). Le seuil de la signification statistique a été fixé à 0,05, seuil classiquement utilisé en psychologie expérimentale. Les valeurs-p exactes ont été utilisées dans le texte de même que dans les tableaux. Lorsqu'elles ne sont pas indiquées, cela signifie qu'elles correspondent à $p > 0,05$ et la mention « n.s. » (non significatif) est inscrite dans les tableaux.

Résultats

Les analyses statistiques effectuées sur les mesures de contrôle ont démontré que les deux groupes étaient équivalents sur le plan affectif, les personnes âgées ne présentant pas plus de symptômes anxieux ou dépressifs que les jeunes (voir Tableau I, p.21). Les résultats ont révélé un niveau d'anxiété très faible chez les participants des deux groupes. Une humeur euthymique était aussi présente chez les participants, à l'exception de quatre âgés et d'un jeune, dont les scores correspondaient à un stade léger de dépression. En outre, les capacités mnésiques, telles qu'évaluées par Les 5 mots (Dubois et al., 2002), sont similaires chez les âgés et les jeunes au rappel immédiat, alors que le rappel différé est légèrement supérieur chez ces derniers ($F[1,23]=5,70$; $p=0,03$). Les deux participants âgés ayant obtenu un score de 18 sur 20 ont été conservés dans les analyses puisque leurs résultats respectifs au MoCA suggéraient un fonctionnement cognitif global adéquat.

Tableau I.

Moyennes et écarts-types en regard des mesures de contrôle pré et post-expérimentation

Mesures de contrôle	Moyennes (écarts-types)		p
	Jeunes	Âgés	
Fonctionnement cognitif			
Montreal Cognitive Assessment (MoCA)	27,79 (1,25)	27,73 (1,56)	n.s.
Les 5 mots			
Rappel immédiat	10,00 (0,00)	9,91 (0,30)	n.s.
Rappel différé	9,79 (0,43)	9,27 (0,65)	0,03*
État affectif			
Beck Depression Inventory (BDI)	4,21 (3,51)	6,00 (5,87)	n.s.
State-Trait Anxiety Inventory (STAI)			
État d'anxiété (A-State)	31,36 (4,46)	28,90 (3,53)	n.s.
Traits anxieux (B-State)	35,30 (7,64)	33,18 (7,86)	n.s.
Réalité virtuelle			
Aisance avec un ordinateur	85,71 (12,99)	60,91(25,77)	0,1*
Questionnaire sur les cybermalaises	9,86 (5,74)	12,00 (6,68)	n.s.
Questionnaire sur le sentiment de présence	2,57 (1,02)	2,73 (1,42)	n.s.
Présence spatiale	10,57 (1,83)	2,73 (1,42)	n.s.
Implication	7,21 (2,46)	8,91 (3,70)	n.s.
Réalisme	7,71 (2,16)	10,00 (1,26)	0,01*

Note. * $p \leq 0,05$

Par ailleurs, les personnes âgées ont rapporté une aisance avec les ordinateurs significativement inférieure à celle des jeunes ($F[1,23]=9,86$; $p=0,01$), se jugeant moins confortables en comparaison aux jeunes qui sont plutôt à l'aise. Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les aînés et les jeunes par rapport aux cybermalaises rapportés. Plus spécifiquement, approximativement 25% des participants ont ressenti « un peu » de cybermalaises pendant ou après l'immersion, ce qui permet d'avoir confiance en la validité des résultats obtenus aux tâches cognitives réalisées dans le VMT-2. Par ailleurs, les participants jeunes et âgés ont rapporté un sentiment de présence équivalent dans la RV, sauf pour l'échelle de réalisme, où ils différaient significativement ($F[1,23]=9,63$; $p=0,01$). En effet, les âgés percevaient l'EV comme étant plus réaliste sur le plan graphique que les jeunes. Finalement, la majorité des participants n'ont pas consommé d'alcool la veille de l'expérimentation. Ceux en ayant consommé ($n=6$) n'ont pas été exclus de l'étude, étant donné qu'aucun lien significatif n'a été retrouvé entre la consommation d'alcool et les cybermalaises ($r[24]= 0,15$; n.s.).

Performances aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles

L'hypothèse suggérant des performances moindres des personnes âgées aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles a été partiellement confirmée par les analyses de variance (ANOVA) pratiquées (voir Tableau II, p.23). Ainsi, il existe une différence significative entre les groupes au CWIT à la Condition 1 ($F[1,26] = 6,63$; $p=0,02$), à la Condition 2 ($F[1,26] = 5,72$; $p=0,02$), à la Condition 3 ($F[1,26] = 39,48$; $p=0,01$) ainsi qu'à la Condition 4 ($F[1,26] = 5,71$; $p=0,02$). Plus précisément, la vitesse de traitement de l'information des participants âgés est inférieure à celle des participants jeunes et leur sensibilité à l'interférence est plus grande. Leur flexibilité cognitive est également moins efficace en comparaison au groupe des jeunes adultes. De plus, une différence significative a été observée dans une épreuve

neuropsychologique qui évaluait la capacité à alterner entre des concepts, soit à la Condition 4 du TMT ($F[1,19] = 7,66$; $p=0,01$), au détriment des âgés. Les analyses réalisées ont aussi mis en évidence des capacités de planification significativement inférieures chez les âgés, tel qu'observé par le Score de planification du *Zoo Map Test* ($F[1,26] = 5,29$; $p=0,03$). Enfin, aucune différence significative n'est retrouvée en lien avec les comportements quotidiens sollicitant les fonctions exécutives chez les participants jeunes et âgés selon le questionnaire d'auto-évaluation DEX.

Tableau II.

Statistiques descriptives des performances aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles et niveau de signification de l'analyse de variance

Épreuves neuropsychologiques traditionnelles	Moyennes (écarts-types)		p
	Jeunes	Âgés	
Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS)			
Color-Word Interference Test (CWIT)			
Condition 1	26,64 (4,40)	31,46 (4,87)	0,02*
Condition 2	20,50 (2,53)	23,00 (3,35)	0,04*
Condition 3			
Temps (en secondes)	43,07 (6,63)	64,81 (12,05)	0,01*
Nombre d'erreurs	0,71 (1,38)	1,73 (2,15)	n.s.
Condition 4			
Temps (en secondes)	51,62 (10,00)	69,18 (10,35)	0,01*
Nombre d'erreurs	1,71 (1,64)	2,00 (2,00)	n.s.
Trail Making Test			
Condition 1	17,64 (3,23)	20,00(2,45)	n.s.
Condition 2	32,39 (10,11)	39,27 (15,59)	n.s.
Condition 3	30,71 (10,04)	35,55 (11,26)	n.s.
Condition 4	54,67 (12,17)	80,78 (22,87)	0,01*
Condition 5	27,79 (11,83)	30,36 (5,39)	n.s.
Tower Test			
Achievement Score	18,57 (2,03)	16,50 (3,34)	n.s.
Move Accuracy Ratio	8,29 (2,40)	8,38 (2,00)	n.s.
Rule-Violations-Per-Item Ratio	10,07 (0,48)	10,57 (0,54)	0,04*
Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome (BADS)			
Zoo Map Test			
Temps total (en secondes)	120,77 (49,57)	156,78 (60,70)	n.s.
Score de planification	5,07 (3,75)	1,36 (5,37)	0,05*
Nombre d'erreurs	0,93 (1,86)	2,55 (4,27)	n.s.
Dysexecutive Questionnaire (DEX)	17,62 (10,77)	23,56 (6,46)	n.s.

Note. * $p \leq 0,05$

Performances dans l'environnement virtuel

Questionnaire sur la charge cognitive

L'index global du NASA-TLX a permis d'observer une charge cognitive significativement plus élevée chez les aînés que chez les jeunes à la suite de la réalisation des tâches dans l'EV ($F[1,23] = 8,07$; $p=0,01$), confirmant l'hypothèse suggérant une plus grande charge cognitive chez ce groupe (voir Tableau III, p.24). Plus spécifiquement, les échelles « Exigence physique » et « Effort » sont significativement supérieures (respectivement ; $F[1,23] = 8,22$; $p=0,01$; $F(1,23) = 13,35$; $p=0,01$). Ainsi, le niveau d'exigence physique et l'intensité de l'effort qui doit être déployé sont perçus comme étant plus grands chez les aînés que chez les jeunes.

Tableau III.

Statistiques descriptives des variables issues de la réalité virtuelle et niveau de signification de l'analyse de variance

Variables issues de la réalité virtuelle	Moyennes (écarts-types)		p
	Jeunes	Âgés	
NASA Task Load Index (NASA-TLX)			
Score total	38,99 (20,15)	59,85 (15,36)	0,01*
Dimensions associées à la tâche	22,36 (12,65)	34,00 (11,50)	0,03*
Exigence mentale	9,38 (4,98)	12,25 (5,99)	n.s.
Exigence physique	5,00 (5,13)	11,27 (5,80)	0,01*
Exigence temporelle	8,36 (4,88)	10,55 (5,59)	n.s.
Dimensions associées aux stratégies	15,64 (9,86)	25,82 (7,77)	0,01*
Performance	9,71 (6,57)	13,18 (4,33)	n.s.
Effort	5,93 (4,53)	12,64 (4,59)	0,01*
Dimension spécifique au participant	8,79 (5,54)	12,00 (4,69)	n.s.
Frustration	8,79 (5,54)	12,00 (4,69)	n.s.
Temps de réalisation (en minutes)			
Temps total	18,84 (8,03)	26,86 (9,69)	0,05*
Hall d'entrée (initiation de la tâche)	0,97 (0,56)	0,95 (0,54)	n.s.
Salon	2,35 (1,45)	2,42 (2,67)	n.s.
Couloir	2,22 (2,03)	2,51 (1,05)	n.s.
Cuisine	10,81 (4,54)	18,81 (8,27)	0,01*
Bureau	1,80 (1,58)	1,00 (1,21)	n.s.
Chambre des maîtres	0,73 (0,71)	1,66 (1,08)	0,04*
Chambre d'amis	0,07 (0,12)	0,12 (0,38)	n.s.
Salle de bain	0,02 (0,05)	0,00 (0,00)	n.s.
Réussite aux tâches			
Score total	5,91 (1,22)	4,36 (1,03)	0,01*
Ranger l'épicerie	1,00 (0,00)	1,00 (0,00)	n.s.
Nourrir le poisson	0,91 (0,30)	0,82 (0,40)	n.s.
Mettre la chemise dans la sècheuse	1,00 (0,00)	1,00 (0,00)	n.s.

Retirer la chemise de la sècheuse	1,00 (0,00)	0,36 (0,50)	0,01*
Regarder si les billets sont sur la table	0,55 (0,52)	0,20 (0,42)	n.s.
Fermer la porte pour empêcher le chien	0,79 (0,43)	0,36 (0,50)	0,03*
Fermer la fenêtre lors de l'orage	0,67 (0,98)	0,55 (0,82)	n.s.

Note. * $p \leq 0,05$

Réalisation des tâches dans la réalité virtuelle

L'hypothèse suggérant que les performances des participants âgés seraient inférieures à celle des participants jeunes dans la RV a été partiellement confirmée. Les analyses réalisées ont démontré que le temps total de complétion des tâches dans le VMT-2 différait de manière significative selon le groupe ($F[1,20] = 4,46$; $p=0,05$), les personnes âgées prenant plus de temps dans l'environnement pour réaliser les différentes tâches. L'analyse du temps passé dans chacune des pièces a mis en évidence que les âgés prenaient significativement plus de temps dans la cuisine ($F[1,20] = 7,90$; $p=0,01$) et dans la chambre des maîtres ($F[1,17] = 4,87$; $p=0,04$). Quant aux tâches à accomplir, les analyses ont révélé que le nombre de tâches réussies était significativement inférieur pour le groupe des participants âgés que celui des participants jeunes ($F[1,20] = 10,32$; $p=0,01$). Plus spécifiquement, ils réussissaient moins souvent à retirer la chemise de la sècheuse ($F[1,20] = 17,50$; $p=0,01$) et oubliaient davantage de fermer la porte pour empêcher le chien d'aller sur le lit de la chambre des maîtres ($F[1,23] = 5,15$; $p=0,03$). La tâche voulant qu'un document soit faxé a été retirée des analyses en raison des difficultés rencontrées sur le plan de la programmation lors de l'expérimentation, entraînant ainsi un trop grand risque d'erreur sur le plan des analyses.

Concernant l'hypothèse de recherche qui visait à comprendre quelles étaient les fonctions cognitives impliquées lors de la réalisation des tâches du VMT-2, les corrélations de Pearson ont permis d'observer plusieurs liens significatifs. Plus spécifiquement, l'examen des corrélations a mis en évidence une relation entre la Condition 1 du CWIT et le temps passé dans

le salon ($r[19] = -0,50, p=0,03$). La vitesse de traitement de l'information semble donc être liée aux activités réalisées dans le salon. Par ailleurs, la Condition 4 était corrélée au fait de retirer la chemise de la sècheuse ($r[21] = -0,43, p=0,05$), suggérant l'implication de la flexibilité cognitive dans l'accomplissement de cette tâche.

Par ailleurs, la Condition 1 du TMT était corrélée au temps total passé dans l'EV ($r[22] = 0,55, p=0,01$) et au temps passé à l'initiation de la tâche dans le hall d'entrée de l'appartement ($r[19] = 0,52, p=0,02$). Ainsi, la vitesse de traitement de l'information et le balayage visuel semblent liés au temps requis pour initier les mouvements/déplacements dans la RV et pour accomplir les tâches.

Enfin, des corrélations entre les tests évaluant les capacités de planification et les performances en RV ont été retrouvées. Les violations de règles dans l'épreuve *Tower Test* étaient corrélées au temps passé dans la cuisine ($r[15] = 0,54, p=0,04$). Aussi, le temps total du *Zoo Map Test* était significativement corrélé au temps passé dans la chambre des maîtres ($r[17] = 0,49, p=0,05$). Le temps passé dans la chambre d'amis était aussi corrélé, d'une part, au nombre d'erreurs commises dans ce test ($r[19] = 0,90, p=0,01$) et, d'autre part, il était corrélé négativement au score de planification ($r[19] = -0,69, p=0,01$). Ces corrélations suggèrent que la planification serait sollicitée lors des activités réalisées dans la chambre des maîtres et la chambre d'amis.

Discussion

La présente recherche visait à examiner les différences d'âge, sur le plan de la performance et de la charge cognitive, lors de la réalisation de tâches cognitives dans un EV. De même, elle visait à explorer les liens existants entre les indices tirés de l'EV et ceux tirés de l'évaluation neuropsychologique traditionnelle des fonctions exécutives, dans une perspective de validité convergente.

Tout comme pour les épreuves traditionnelles, les résultats issus du VMT-2 ont mis en évidence des différences sur le plan du fonctionnement qui sont reliées à l'âge. Plus précisément, le temps nécessaire pour réaliser l'ensemble des tâches dans l'EV était supérieur chez les individus âgés sains comparativement aux individus jeunes. Ceci est cohérent non seulement avec l'étude exploratoire précédemment mentionnée de Banville et al. (2013) qui démontrait que les personnes âgées étaient plus lentes que les jeunes dans l'EV, mais également avec des études ayant eu recours à d'autres protocoles expérimentaux (Chen et Or, 2017; Zakzanis, Qutin, Graham et Mraz, 2009; Sayers, 2004). En effet, Chen et Or (2017) ont comparé les performances de trois groupes d'individus de différents âges quant à leur capacité à pointer des cibles et à manipuler des objets virtuels selon trois interfaces (c.-à-d. en immersion en RV où le participant enfilaient un gant permettant de capter ses mouvements, en utilisant une souris reliée à un écran d'ordinateur, en utilisant un écran tactile). Les personnes âgées (65-75 ans) avaient besoin de plus de temps dans les trois conditions, en comparaison aux plus jeunes (18-30 ans et 40-55 ans). Dans l'étude de Zakzanis et al. (2009), les participants âgés et jeunes devaient naviguer dans un EV en suivant un trajet prédéterminé, où le temps pris pour le compléter était comptabilisé. Les résultats ont également mis en évidence une vitesse d'exécution inférieure

chez les aînés. Une autre étude (Sayers, 2004) a aussi démontré que les personnes qui sont âgées de 46 ans et plus avaient besoin de plus de temps dans la RV que les personnes de 18 à 45 ans, et ce, même lorsque des outils visant à faciliter la navigation pouvaient être utilisés (p. ex., une carte).

Afin d'expliquer pourquoi le temps de réalisation des tâches dans la RV diffère entre les âgés et les jeunes, trois hypothèses peuvent être avancées : des difficultés sur le plan de la navigation spatiale, des difficultés d'interactions personne-machine (incluant la familiarité et l'aisance avec les ordinateurs, de même que les techniques d'interaction) et enfin, la cognition, qui serait altérée avec l'âge. Verhulst et al. (2017) ont exploré les patrons de navigation des participants provenant de données complémentaires à la présente étude. Les résultats ont établi que les patrons de déplacements étaient moins efficaces chez les personnes âgées, nécessitant par le fait même plus de temps pour accomplir l'ensemble des tâches dans l'EV. Considérant la préservation des capacités de navigation spatiale (Newman et Kaszniak, 2000) jusqu'à l'âge approximatif de 70 ans (Gazova et al., 2013), d'autres pistes d'explications doivent être explorées pour mieux comprendre les performances des aînés dans un EV.

En ce sens, l'atteinte des patrons de navigation pourrait résulter plutôt de l'interaction personne-machine, d'où l'importance de s'interroger sur l'impact qu'elle a sur les performances. Dans la présente étude, les personnes âgées ont rapporté une charge cognitive plus importante que les jeunes quant aux dimensions associées à la tâche, et plus spécifiquement sur l'échelle d'exigence physique. Ceci signifie que les âgés ont ressenti avoir déployé plus d'efforts physiques pour effectuer des opérations dans l'EV (p. ex., pousser ou tirer). À l'évidence, cette différence entre les deux groupes suggère qu'il est plus ardu pour les personnes âgées d'utiliser le matériel de navigation et pourrait donc avoir contribué à rendre leurs déplacements plus lents.

D'ailleurs, une récente étude (Chen et Or, 2017) a démontré que les personnes âgées auraient effectivement davantage de difficulté à se déplacer et à saisir des objets virtuels, et ce, même lorsque cela n'implique pas une immersion dans un EV et de la navigation, mais plutôt le recours à une souris d'ordinateur ou à un écran tactile.

Qui plus est, l'expérience des individus avec la technologie pourrait expliquer la différence au niveau du temps de réalisation dans la RV entre les aînés et les jeunes. L'étude de Zakzanis et ses collègues (2009) a pourtant mis en évidence une vitesse d'exécution inférieure chez les aînés sains, et ce, en dépit d'une familiarité avec les ordinateurs qui était jugée équivalente entre les deux groupes. La familiarité avait toutefois été opérationnalisée selon le nombre d'années d'utilisation d'un ordinateur des participants (moyenne chez les âgés de 10,71 ans et de 11,25 ans chez les jeunes). De cette façon, il est possible que l'opérationnalisation de la variable « familiarité » n'ait pas été en mesure de représenter avec justesse l'expérience des aînés avec les ordinateurs en raison d'une potentielle variabilité dans l'utilisation hebdomadaire des médias électroniques et informatiques. La fréquence d'utilisation, dans ce cas-ci, devient donc une variable importante. Néanmoins, dans l'étude, le nombre d'années d'expérience avec les jeux vidéo avait aussi été documenté et était, quant à lui, significativement différent entre les groupes (moyenne chez les âgés de 0,14 an et de 6,50 ans chez les jeunes). Bref, il semble difficile dans le cas de cette étude, tout comme dans les autres études ayant obtenu des résultats similaires aux nôtres, de comprendre l'apport de l'expérience des individus avec la technologie sur leurs performances en RV. En effet, Chen et Or (2017) ont documenté l'expérience des individus avec les interfaces utilisées dans leur étude selon leur fréquence d'utilisation allant de « jamais » à « toujours », sans toutefois faire des analyses autres que descriptives, alors que Sayers (2004) a sélectionné des participants n'ayant pas d'expérience avec la navigation tridimensionnelle,

mais n'a pas fait mention de leur expérience avec les ordinateurs. Conséquemment, l'expérience des individus avec la technologie, en lien avec leur performance en RV, demeure questionnable. Dans la présente étude, les résultats ont mis en lumière une différence significative par rapport à l'aisance des participants avec les ordinateurs entre les deux groupes, où les personnes âgées avaient, d'un point de vue subjectif, un niveau d'aisance inférieur de 15% en comparaison aux jeunes. Afin d'explorer un lien possible entre l'aisance et le temps passé dans le VMT-2, des analyses a posteriori ont été effectuées. La perception qu'avaient les participants par rapport à leur aisance à utiliser les ordinateurs ne semble pas être en lien avec le temps dont ils ont besoin pour réaliser les tâches ($r[22] = 0,01, p=0,99$). Ainsi, certains participants pouvaient juger ne pas être très à l'aise avec les ordinateurs, mais pourtant performer de façon similaire aux participants ayant jugé être plus à l'aise. Cette information est intéressante en ce sens qu'elle propose que l'usage de la technologie soit accessible pour tous, car le fait de ne pas se sentir à l'aise de l'utiliser n'est pas lié à de moins bonnes performances.

Par ailleurs, en ce qui a trait à la deuxième hypothèse de cette étude, des corrélations positives ont confirmé des liens entre la vitesse de traitement de l'information ainsi que le balayage visuel (Condition 1 du TMT), et le temps total pris pour la réalisation de l'ensemble des tâches proposées dans l'EV. Le même patron de corrélation a été observé entre le score obtenu à cette condition du TMT et le temps d'initiation de la tâche, qui correspond au temps pris par les participants entre le début de celle-ci et l'action d'entrer dans l'appartement virtuel. Ces résultats suggèrent que le temps requis pour démarrer les tâches dans le VMT-2 et pour les réaliser en entier reflète la vitesse de traitement de l'information et l'exécution d'un balayage visuel efficient. Conséquemment, la mesure du temps nécessaire pour exécuter les tâches

proposées dans le VMT-2 semble un indice pertinent puisqu'il reflète la cognition, ce que d'autres analyses corrélationnelles ont également démontré.

En effet, la vitesse de traitement de l'information (Condition 1 du CWIT) est liée au temps passé dans le salon, soit au temps pris pour répondre au téléphone, regarder si les billets sont sur la table du salon et entrer dans le bureau pour faxer un document. Toutefois, une analyse qualitative de la performance des participants laisse penser que ces résultats peuvent être expliqués en partie par des problèmes techniques intermittents. Premièrement, dans certains cas, ces problèmes rendaient impossible le fait de décrocher le téléphone, si bien que l'expérimentateur suggérait au participant de simplement poursuivre les autres activités. Deuxièmement, le téléphone pouvait sonner à deux reprises et le participant écoutait le même message vocal. Troisièmement, certains participants terminaient les tâches qui leur avaient été données avant que le troisième coup de téléphone ne sonne. Ces différents cas de figure ont engendré inévitablement un déséquilibre dans le temps passé dans cette pièce non seulement en raison des problèmes techniques en soi, mais aussi, parce que certains participants ont écouté les messages téléphoniques à une ou deux reprises, alors que d'autres non, et que leur durée (8, 11 et 18 secondes) n'a pas été considérée dans les analyses. De plus, tel que mentionné précédemment, la réussite ou l'échec de la tâche du fax a été retiré des analyses en raison de problèmes techniques sur le plan de la programmation. Le temps pris pour exécuter la tâche (ou tenter de l'exécuter) n'a toutefois pas été retiré. En somme, malgré la corrélation retrouvée, il n'est pas possible d'assumer que le temps passé à effectuer les tâches dans le salon reflète spécifiquement la vitesse de traitement de l'information. Nous croyons qu'une mesure plus juste de cette fonction pourrait être obtenue en comptabilisant le temps passé dans le salon lorsque les problèmes techniques seraient résolus. De ce fait, la durée des messages vocaux

n'engendrerait pas de déséquilibre de temps entre les participants puisque tous y seraient exposés de façon identique, de même pour la tâche du fax, qui serait fonctionnelle à chaque utilisation du VMT-2.

Un autre élément en lien avec les appels téléphoniques dans la RV est à considérer. En effet, puisque des participants appartenant au groupe des jeunes terminaient les tâches avant le troisième coup de téléphone, ils n'avaient pas l'occasion d'entendre la consigne de regarder si les billets étaient sur la table basse du salon, menant automatiquement à l'échec de cette tâche (et aussi à un temps de réalisation plus rapide). En dépit de cela, aucune différence significative n'est ressortie entre les groupes quant à la réussite de cette tâche, car la majorité des participants âgés ne l'accomplissaient pas non plus en raison d'oublis (Verhulst et al., 2017). Nous constatons que des changements devraient être apportés dans la façon dont les appels téléphoniques dans le VMT-2 sont déclenchés. Lors de l'expérimentation, une ligne du temps dictait le moment où ils se faisaient entendre. La séquence pourrait être modifiée pour que le troisième appel sonne plus tôt (p. ex., à 12 minutes plutôt qu'à 15 minutes) ou que le déclenchement de l'appel se produise en réponse à l'avancement d'autres tâches (p. ex., lorsqu'il ne reste que cinq items de l'épicerie à ranger).

Une tâche du VMT-2 s'est avérée corrélée avec la flexibilité cognitive (Condition 4 du CWIT), soit le fait de retirer la chemise de la sècheuse en effectuant plusieurs manœuvres (p. ex., ouvrir les portes du placard, se positionner devant la sècheuse de façon à pouvoir ouvrir la porte). En effet, une plus grande difficulté à alterner entre des concepts lors des épreuves neuropsychologiques était liée à un moins haut taux de succès de la tâche. Les personnes âgées ont justement moins bien performé sur le plan de la flexibilité cognitive et lors du retrait de la chemise de la sècheuse dans l'EV. L'interaction personne-machine a pu être particulièrement

déterminante dans la réalisation de cette tâche, étant donné que l'accès à la sècheuse nécessitait de multiples manœuvres d'ajustement pour naviguer dans l'espace restreint où elle se trouvait. Or, il apparaît toutefois intéressant de constater que la flexibilité cognitive des participants était sollicitée alors qu'ils alternaient entre l'exécution de la tâche dans l'EV et la manipulation du matériel (souris, clavier) dans le monde réel.

Les analyses corrélationnelles ont mis en évidence des liens entre les capacités de planification et le temps requis pour la réalisation des tâches dans la cuisine, la chambre des maîtres et la chambre d'amis. Tout d'abord, plus les participants commettaient un nombre élevé de violations de règles lors d'une tâche de planification (*Tower Test*), plus ils prenaient du temps pour ranger l'épicerie. Ainsi, il semble que la tâche de rangement sollicite la capacité de coordonner ses efforts pour atteindre un but (soit le rangement de tous les items) tout en inhibant des comportements non appropriés ou en réajustant ses plans à la suite des appels téléphoniques. Dans notre échantillon, les participants âgés prenaient plus de temps pour l'effectuer que les jeunes, tout comme ils performaient moins bien au test neuropsychologique standard. La tâche de rangement de l'épicerie pourrait ainsi indiquer de moins bonnes capacités de planification.

Le même constat s'applique aux activités réalisées dans la chambre des maîtres, où les personnes âgées avaient également besoin de plus de temps que les jeunes pour effectuer les activités proposées, soit manipuler la chemise en vue de la mettre dans la sècheuse, nourrir le poisson et fermer la porte en sortant de la chambre. Les analyses ont démontré que plus la durée d'exécution de ces activités était longue, plus les participants prenaient de temps pour planifier un trajet (temps total du *Zoo Map Test*). Ainsi, les activités réalisées dans la chambre des maîtres semblent solliciter les capacités de planification des participants.

Enfin, puisqu'un orage éclatait et que de l'eau s'infiltrait dans la chambre d'amis, les participants devaient fermer la fenêtre, comme ils devraient le faire dans le monde réel si un tel événement se produisait. Le temps pris pour constater l'incident ainsi que pour fermer la fenêtre est corrélé à la fois avec le score de planification et le nombre d'erreurs commises dans le *Zoo Map Test*. Plus spécifiquement, plus les participants avaient besoin de temps pour réajuster leurs plans, constater les dégâts et fermer la fenêtre, plus ils commettaient d'erreurs dans l'épreuve neuropsychologique et moins leur score de planification était élevé, donc moins leurs stratégies étaient efficaces. Les participants âgés ont d'ailleurs obtenu un moins bon score de planification dans le *Zoo Map Test*. Toutefois, leurs performances dans la RV étaient similaires à celles des jeunes à cette tâche. Effectivement, le taux de réussite et le temps de réalisation de la tâche étaient tous deux similaires entre les groupes. En somme, il apparaît que les capacités de planification semblent impliquées dans plusieurs tâches réalisées dans l'EV.

Toujours concernant les tâches réalisées dans le VMT-2, l'une d'entre elles a été conçue dans l'optique d'évaluer la mémoire prospective, une capacité qui déclinerait avec l'avancement en âge (Kalpouzos, Eustache et Desgranges, 2008). C'est du moins la fonction qu'évaluerait la tâche où les participants devaient, tout au long de l'immersion, fermer la porte de la chambre des maîtres pour éviter que le chien puisse y entrer (tâche de mémoire prospective basée sur l'activité). Les résultats ont démontré que les âgés réussissaient significativement moins bien cette tâche que les personnes jeunes. Des études antérieures réalisées dans des EV ont également démontré que les performances des personnes âgées étaient inférieures à celles des jeunes en mémoire prospective lorsque l'environnement dans lequel prendrait place la tâche était bruyant (Knight, Nicholls et Titov, 2008) et lorsque la tâche concurrente sollicitait de grandes ressources cognitives, en opposition à une tâche moins exigeante (Logie, Maylor, Della Sala et Smith,

2004). Bien que l'environnement sonore du VMT-2 était davantage imprévisible que bruyant (la sonnerie du téléphone, l'orage qui éclate), ces éléments semblent cohérents et en mesure d'expliquer les performances délétères des âgés en mémoire prospective. Dans le cas qui nous concerne, la tâche (fermer la porte afin que le chien ne monte pas sur le lit) apparaît donc comme étant sensible, car elle est en mesure de différencier les performances des adultes jeunes et âgés.

Enfin, la troisième hypothèse de recherche suggérant que les âgés rapporteraient une plus grande charge cognitive que les jeunes a été confirmée. Ceci semble cohérent notamment avec les travaux de Hess, Smith et Sharifian (2016), qui ont examiné la charge cognitive d'un groupe de jeunes adultes et d'âgés, laquelle était générée lors de la réalisation d'une tâche de mémoire de travail. La charge cognitive s'est avérée significativement supérieure chez les personnes âgées, telle que mesurée par le NASA-TLX. Il en va de même pour une étude réalisée dans notre laboratoire (Banville et al., 2013), où les aînés rapportaient être davantage surchargés cognitivement que les jeunes lors de la réalisation des tâches dans le VMT-2. Les résultats de la présente étude sont donc cohérents avec la littérature et ont répliqué ceux de l'étude effectuée dans notre laboratoire, mais avec un plus grand nombre de sujets.

Tel que mentionné précédemment, Allain et al. (2014) ont suggéré que l'interaction avec l'EV pouvait surcharger cognitivement les participants et affecter leurs performances. Outre l'impact des techniques d'interaction, ceci s'expliquerait le fait qu'une multitude d'informations doivent être traitées pour réaliser une tâche dans la RV, alors les personnes âgées ont une vitesse de traitement de l'information réduite avec l'avancement en âge, tel qu'observé dans la présente étude, de même que des ressources attentionnelles moindres (Fortenbaugh et al., 2015). Ainsi, l'interaction personne-machine aurait contribué à la surcharge cognitive vécue par les aînés, et ce, indépendamment de la performance cognitive liée à la tâche. Afin d'explorer cette piste plus

en détail, nous avons exécuté des analyses a posteriori par rapport à l'aisance de nos participants avec les ordinateurs en lien avec la charge cognitive. Les résultats ont démontré qu'un niveau d'aisance moins grand serait corrélé avec une plus grande charge cognitive ($r[25] = -0,58$, $p=0,01$), supposant donc que les individus moins à l'aise à interagir avec l'EV seraient plus enclins à se sentir surchargés. En examinant les résultats pour chacune des échelles du NASA-TLX, il a toutefois été intéressant de constater l'absence de lien entre l'aisance avec les ordinateurs, rapportée par les participants, et l'échelle de performance ($r[25] = -0,31$, $p=0,13$). Autrement dit, qu'un individu se sente à l'aise ou non avec les ordinateurs n'aurait pas de lien avec l'appréciation qu'il a de sa performance.

Forces et limites

La présente étude a examiné la capacité du VMT-2 à déterminer les différences qui existent entre des individus âgés et jeunes en réalisant des tâches qui se veulent être une réplique d'activités quotidiennes. La RV a l'avantage d'offrir une plus grande écologie de la mesure que les épreuves traditionnelles grâce à la vérisimilitude de l'environnement, et à être sensible aux altérations du fonctionnement cognitif : c'est probablement pourquoi les performances des aînés dans le VMT-2 différaient de celles des jeunes, alors que leur fonctionnement quotidien était similaire, tel que rapporté par les participants (résultats au DEX). D'un autre côté, l'usage de cet outil a révélé des défis majeurs propres à l'utilisation de la technologie. Tel que discuté précédemment, les problèmes techniques rencontrés au cours des expérimentations ont entravé la cueillette de données et constituent sans doute la plus grande limite de la présente étude. Afin d'avoir accès au plein potentiel que l'outil peut offrir, ces problèmes devront être résolus avant d'entreprendre une future recherche avec le VMT-2. De prime abord, le changement le plus important serait de modifier la façon dont les tâches, ou certaines d'entre elles, sont déclenchées

pour s'assurer que tous les participants y soient exposés de façon identique. Il serait également opportun de modifier la séquence temporelle des tâches pour que les participants aient plus de temps pour effectuer les déplacements qui s'imposent dans l'EV entre le premier appel (à une minute) et le second (à deux minutes). Par ailleurs, la présence de cybermalaises chez certains participants est une autre limite de notre étude. En effet, seulement deux participants ont réalisé l'expérimentation en entier en mode immersif, les autres ressentant trop de cybermalaises. Au total, 25% de notre échantillon en a ressenti un peu, que ce soit pendant ou à la suite de notre expérimentation, et ce, malgré le retrait du visiocasque en phase de familiarisation ou durant l'expérimentation. Ces données incitent à apporter des changements pour réduire autant que possible les effets indésirables vécus par les participants (p. ex., agrandir les pièces, diminuer au maximum les délais de rafraîchissement des images, etc.) et pouvoir utiliser le VMT-2 en mode immersif, augmentant ainsi la vérisimilitude de l'environnement.

La composition de l'échantillon est également l'une des limites identifiées puisque les participants pourraient ne pas représenter de façon exacte leurs groupes d'âge respectifs, ce qui aurait influencé par le fait même les résultats. En ce sens, les participants jeunes pourraient avoir accepté de participer à l'étude en raison d'un intérêt personnel envers la technologie et d'une plus grande aisance à naviguer dans un environnement tridimensionnel que d'autres individus du même âge. Quant aux participants âgés, deux explications complètement opposées sont envisageables. D'une part, ils présentaient peut-être des plaintes cognitives subjectives et étaient attirés par la compensation offerte en échange de leur participation (c.-à-d. un rapport résumé de leurs performances cognitives aux tests neuropsychologiques traditionnels). À l'inverse, il est aussi possible de penser que les participants âgés qui ont voulu participer soient plus actifs que leurs homologues. Enfin, le nombre limité de participants restreint certainement la

généralisation des résultats. Néanmoins, la pertinence des résultats obtenus est substantielle en ce sens que des différences de performances ont été retrouvées entre les deux groupes d'âge malgré la petite taille d'échantillon, justifiant par conséquent l'intérêt de poursuivre les recherches dans ce champ d'étude liant l'utilisation de la RV et l'évaluation neuropsychologique.

Conclusion

Les résultats de la présente étude ont démontré que les personnes âgées saines offrent des performances inférieures aux jeunes lors de la réalisation de tâches implantées dans un EV : elles prennent plus de temps pour exécuter les tâches proposées et parviennent à en compléter moins. Aussi, les âgés ont rapporté être davantage surchargés cognitivement lorsqu'ils sont en interaction avec l'EV. À la lumière de ceci, nous suggérons qu'ils éprouvent davantage de difficultés à interagir avec l'EV, mais surtout, que le profil cognitif observé chez ce groupe aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles explique les divergences de résultats. Les tâches réalisées dans l'EV solliciteraient la vitesse de traitement de l'information, le balayage visuel, la flexibilité cognitive et les capacités de planification, malgré les problèmes techniques rencontrés et les biais que cela a pu causer dans la collecte de données. La mémoire prospective semble également touchée, tel que démontré par la performance à une tâche basée sur l'activité.

Au terme de notre étude, nous sommes d'avis que le VMT-2 est un outil prometteur puisqu'il est sensible au déclin cognitif lié à l'âge, mis en évidence par l'exécution de tâches similaires au quotidien. Il serait toutefois prématuré de l'employer auprès de populations cliniques. Nous considérons qu'il serait également prématuré d'utiliser cet outil pour statuer sur l'intégrité des fonctions cognitives de manière isolée, au même titre que les épreuves neuropsychologiques traditionnelles. À l'heure actuelle, il est plus prudent de considérer le VMT-2 comme un protocole expérimental évaluant le fonctionnement cognitif global, où plusieurs fonctions cognitives, dont exécutives, interagissent dans l'accomplissement des multiples tâches. La présente étude représente donc une avancée dans la compréhension de l'outil puisqu'aucun lien n'avait été fait auparavant entre les performances issues du VMT-2 et celles provenant d'épreuves neuropsychologiques traditionnelles. De futures études devront être

entreprises, après avoir apporté des changements au plan de la programmation des tâches, en examinant à nouveau les liens entre les tests traditionnels et les indices issus du VMT-2, de même que pour réaliser des analyses de consistance interne (étude de fidélité). Enfin, dans une perspective plus large, la RV est un moyen d'évaluation neuropsychologique qui offre des possibilités infinies et, tel que démontré dans la présente étude, peut bel et bien être employé auprès des âgés. De nombreux défis restent à relever notamment pour rendre les techniques d'interaction les plus simples d'utilisation possible. Aussi, l'expérience que les individus ont avec la technologie devrait systématiquement être prise en considération dans les futures études dans l'optique d'une compréhension plus intégrée et juste des résultats.

Références

- Adólfssdóttir, S., Wollschlaeger, D., Wehling, E., & Lundervold, A. J. (2017). Inhibition and switching in healthy aging: a longitudinal study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 23(1), 90-97.
- Allain, P., Foloppe, D. A., Besnard, J., Yamaguchi, T., Etcharry-Bouyx, F., Le Gall, D., ... & Richard, P. (2014). Detecting everyday action deficits in Alzheimer's disease using a nonimmersive virtual reality kitchen. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 20(5), 468-477.
- Allain, P., Nicoleau, S., Pinon, K., Etcharry-Bouyx, F., Barré, J., Berrut, G., ... & Le Gall, D. (2005). Executive functioning in normal aging: A study of action planning using the Zoo Map Test. *Brain and cognition*, 57(1), 4-7.
- Ang, C. S., Zaphiris, P., & Mahmood, S. (2007). A model of cognitive loads in massively multiplayer online role playing games. *Interacting with computers*, 19(2), 167-179.
- Ardila, A. (2007). Normal aging increases cognitive heterogeneity: Analysis of dispersion in WAIS-III scores across age. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 228(8), 1003-1011.
- Banville, F., Couture, J. F., Verhulst, E., Besnard, J., Richard, P., & Allain, P. (2017). Using Virtual Reality to Assess the Elderly : The Impact of Human-Computer Interfaces on Cognition. In *International Conference on Humain Interface and the Management of Information* (113-123). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-58524-6_10
- Banville, F., Forget, H., Bouchard, S., Page, C., & Nolin, P. (2013). Le virtual Multitasking Test, un outil d'évaluation de fonctions exécutives : une étude pilote. Conférence présentée au congrès de la SQRP, Chicoutimi : 22, 23 et 24 mars 2013.
- Banville, F., Nolin, P., Verhulst, E., Rosinvil, T., & Allain, P., (sous presses). Assessment and rehabilitation using virtual reality after traumatic brain injury: a systematic literature review. In A. S. Rizzo & S. Bouchard. *Virtual reality for Psychological and Neurocognitive interventions*". 2. Springer
- Beck, A. T., Steer, R. A., & Brown, G. K. (1996). Beck Depression Inventory-ii (bdi-ii). *San Antonio, TX: Psychological Coroporation*.
- Besançon, L., Issartel, P., Ammi, M., & Isenberg, T. (2016). Usability comparison of mouse, touch and tangible inputs for 3D data manipulation. *arXiv preprint arXiv:1603.08735*.
- Borghesani, P. R., Madhyastha, T. M., Aylward, E. H., Reiter, M. A., Swarny, B. R., Schaies, K. W., & Willis, S. L. (2013). The association between higher order abilities, processing

- speed, and age are variably mediated by white matter integrity during typical aging. *Neuropsychologia*, 51(8), 1435-1444.
- Bouchard, S., Côté, S., & Richard, D. (2007). Virtual reality applications for exposure. In D. Richard et D. Lauterbach (Eds.), *Handbook of Exposure Therapies* (347-388). Florida, FL: Academic Press.
- Bugg, J. M., Zook, N. A., DeLosh, E. L., Davalos, D. B., & Davis, H. P. (2006). Age differences in fluid intelligence: contributions of general slowing and frontal decline. *Brain and cognition*, 62(1), 9-16.
- Butler, K. M., & Zacks, R. T. (2006). Age deficits in the control of prepotent responses: Evidence for an inhibitory decline. *Psychology and aging*, 21(3), 638.
- Caffò, A. O., De Caro, M. F., Picucci, L., Notarnicola, A., Settanni, A., Livrea, P., ..., & Bosco, A. (2012). Reorientation deficits are associated with amnesic mild cognitive impairment. *American journal of Alzheimer's disease and other dementias*, 27(5), 321-330. doi: 10.1177/1533317512452035
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. In B. Cahour, F. Anceaux et A. Giboins (Eds.), *EPIQUE 2009 : 5^{ème} Colloque de Psychologie Ergonomique*, 233-239. Nice, France.
- Chan, R. C., Shum, D., Touloupoulou, T., & Chen, E. Y. (2008). Assessment of executive functions: Review of instruments and identification of critical issues. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 23(2), 201-216.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Armand Colin.
- Chemloul, S., & Banville, F. (2016, avril). *La charge cognitive via la réalité virtuelle devrait-elle tenir compte des aspects liés à la navigation dans l'environnement ?* Communication présentée au congrès de la Société québécoise de recherche en psychologie, 1-3 avril 2016.
- Chen, J., & Or, C. (2017). Assessing the use of immersive virtual reality, mouse and touchscreen in pointing and dragging-and-dropping tasks among young, middle-aged and older adults. *Applied Ergonomics*, (65), 437-448.
- Climent-Martinez, G., Luna-Lario, P., Bombin-Gonzalez, I., Cifuentes-Rodríguez, A., Tirapu-Ustarroz, J., & Diaz-Orueta, U. (2014). Neuropsychological evaluation of the executive functions by means of virtual reality. *Revista de neurologia*, 58(10), 465-475.
- Collette, F., & Salmon, E. (2014). Les effets du vieillissement normal et pathologique sur la cognition. *Revue Médicale de Liège*, 69(5-6), 265-269.

- Cowppli-Bony, P., Fabrigoule, C., Letenneur, L., Ritchie, K., Alperovitch, A., Dartigues, J. F., & Dubois, D. (2005). Le test des 5 mots : validité dans la détection de la maladie d'Alzheimer dans la population générale. *Revue Neurologique*, *161*(12), 1205-1212.
- Delis, D. C., Kaplan, E., & Kramer, J. H. (2001). *Delis-Kaplan executive function system (D-KEFS)*. Psychological Corporation.
- DiDomenico, A., & Nussbaum, M. A. (2011). Effects of different physical workload parameters on mental workload and performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *41*(3), 255-260.
- Dubois, B., Touchon, J., Portet, F., Ousset, P. J., Vellas, B., & Michel, B., «Les 5 mots», épreuve simple et sensible pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer. *Presse Med*, *31*, 1696-1699.
- Ellis, J. (1996). Prospective memory or the realization of delayed intentions: A conceptual framework for research. *Prospective memory: Theory and applications*, 1-22.
- Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (2008). Évolution du contrôle exécutif au cours du vieillissement normal. *Revue neurologique*, *164*(12), 1010-1017.
- Flynn, D., Van Schail, P., Blackman, T., Femcott, C., Hobbs, B., & Calderon, C. (2003). Developing a virtual reality-based methodology for people with dementia: a feasibility study. *CyberPsychology & Behavior*, *6*(6), 591-611.
- Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., Germine, L., Wilmer, J. B., Grosso, M., Russo, K., & Esterman, M. (2015). Sustained attention across the life span in a sample of 10,000: dissociation ability and strategy. *Psychological science*, *26*(9), 1497-1510.
- Gauthier, J., & Bouchard, S. (1993). Adaptation canadienne-française de la forme révisée du State-Trait Anxiety Inventory de Spielberger. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue Canadienne des sciences du comportement*, *25*(4), 559-578, <http://dx.doi.org/10.1037/h0078881>
- Gazova, I., Laczó, J., Rubinova, E., Mokrisova, I., Hyncicova, E., Anđel, R., ... & Hort, J. (2013). Spatial navigation in young versus older adults. *Frontiers in aging neurosciences*, *5*(94).
- Giebel, C. M., Sutcliffe, C., Stolt, M., Karlsson, S., Renom-Guiteras, A., Soto, M., ... et Challis, D. (2014). Deterioration of basic activities of daily living and their impact on quality of life across different cognitive stages of dementia: a European study. *International Psychogeriatrics*, *26*(08), 1283-1293.
- Gold, D. A. (2012). An examination of instrumental activities of daily living assessment in older adults and mild cognitive impairment. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, *34*(1), 11-34.

- Harada, C. N., Love, M. C. N., & Triebel, K. L. (2013). Normal cognitive aging. *Clinics in geriatric medicine*, 29(4), 737-752.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock et N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (p. 139-184). Elsevier Science Publishers: North-Holland.
- Hess, T. M., Smith, B. T., & Sharifian, N. (2016). Aging and effort expenditure: The impact of subjective perceptions of task demands. *Psychology and aging*, 31(7), 653.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kalpouzos, G., Eustache, F., & Desgranges, B. (2008). La mémoire prospective au cours du vieillissement: déclin ou préservation?. *NPG Neurologie-Psychiatrie-Gériatrie*, 8(47), 25-31.
- Kannape, O. A., Barré, A., Aminian, K., & Blanke, O. (2014). Cognitive loading affects motor awareness and movement kinematics but not locomotor trajectories during goal-directed walking in a virtual reality environment. *PloS one*, 9(1), e85560.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203-220. doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kizony, R., Levin, M. F., Hughey, L., Perez, C., & Fung, J. (2010). Cognitive load and dual-task performance during locomotion poststroke: a feasibility study using a functional virtual environment. *Physical therapy*, 90(2), 252-260.
- Kliegel, M., Eschen, A., & Thöne-Otto, A. I. (2004). Planning and realization of complex intentions in traumatic brain injury and normal aging. *Brain and cognition*, 56(1), 43-54.
- Knight, R. G., Nicholls, J., & Titov, N. (2008). The effects of old age and distraction on the assessment of prospective memory in a simulated naturalistic environment. *International psychogeriatrics*, 20(1), 124-134.
- Koen, J. D., & Yonelinas, A. P. (2014). The effects of healthy aging, amnesic mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease on recollection and familiarity: a meta-analytic review. *Neuropsychology review*, 24(3), 332-354.
- Lau, K. M., Parikh, M., Harvey, D. J., Huang, C. J., & Farias, S. T. (2015). Early Cognitively Based Functional Limitations Predict Loss of Independence in Instrumental Activities of Daily Living in Older Adults. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 21(09), 688-698.
- Lawton, M. P., & Brody, E. M. (1969). Assessment of older people: Self-maintaining and instrumental activities of daily living. *Gerontologist*, 9, 179-186.

- Logie, R., Maylor, E., Della Sala, S., & Smith, G. (2004). Working memory in event-and time-based prospective memory tasks: Effects of secondary demand and age. *European Journal of cognitive psychology, 16*(3), 441-456.
- Marshall, G. A., Rentz, D. M., Frey, M. T., Locascio, J. J., Johnson, K. A., Sperling, R. A., & Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. (2011). Executive function and instrumental activities of daily living in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia, 7*(3), 300-308.
- Martin, M., Kliegel, M., & McDaniel, M. A. (2003). The involvement of executive functions in prospective memory performance of adults. *International Journal of Psychology, 38*(4), 195-206.
- Massicotte, E., Lussier, C., Verhulst, E., & Banville, F. (2017, mars). *The virtual multitasking test for assessing elderly: Preliminary psychometric data*. Communication présentée au 2nd International Workshop on Alzheimer, MCI, and Information Technologies (IWAMIT), 26-27 mars 2017, Tokyo.
- McDermott, L. M., & Ebmeier, K. P. (2009). A meta-analysis of depression severity and cognitive function. *Journal of affective disorders, 119*(1), 1-8.
- Meulemans, T. (2006). Les fonctions exécutives: approche théorique. Dans (P. Pradat-Diehl, P. Azouvi, et V. Brun (EDS). *Fonctions exécutives et rééducation*. 1-20. Masson.
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., ..., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society, 53*(4), 695-699.
- Neguț, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: a meta-analytic review. *The Clinical Neuropsychologist, 30*(2), 165-184.
- Newman, M. C., & Kaszniak, A. W. (2000). Spatial memory and aging: performance on a human analog of the Morris water maze. *Aging, Neuropsychology, and Cognition, 7*(2), 86-93.
- Nolin, P., Banville, F., Cloutier, J., & Allain, P. (2013). Virtual Reality as a New Approach to Assess Cognitive Decline in the Elderly. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies, 2*(8), 612-616. doi: 10.5901/ajis.2013.v2n8p612
- Organisation mondiale de la santé (2017, mai). *La démence*. Aide-mémoire No362. Repéré le 01-08-2017 à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs362/fr/>
- Organisation mondiale de la santé. (2016). Rapport mondial sur le vieillissement et la santé. Repéré le 01-08-2017 à http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/206556/1/9789240694842_fre.pdf

- Overdorp, E. J., Kessels, R. P., Claassen, J. A., & Oosterman, J. M. (2016). The Combined Effect of Neuropsychological and Neuropathological Deficits on Instrumental Activities of Daily Living in Older Adults: a Systematic Review. *Neuropsychology review*, 1-15.
- Owsley, C., Sloane, M., McGwin Jr, G., & Ball, K. (2002). Timed instrumental activities of daily living tasks: relationship to cognitive function and everyday performance assessments in older adults. *Gerontology*, 48(4), 254-265.
- Parsons, T. D., Silva, T. M., Pair, J., & Rizzo, A. A. (2008). Virtual environment for assessment of neurocognitive functioning: virtual reality cognitive performance assessment test. *Studies in Health Technology and Informatics*, 132, 351.
- Piquard, A., Derouesné, C., Meininger, V. & Lacomblez, L. (2010). DEX et évaluation des fonctions exécutives dans les activités de la vie quotidienne dans la maladie d'Alzheimer et la démence frontotemporale. *Psychologie & NeuroPsychiatrie du vieillissement*, 8(3), 215-227.
- Pratt, D. R., Zyda, M., & Kelleher, K. (1995). Virtual reality: In the mind of the beholder. *Computer*, (7), 17-19.
- Prince, M., Wimo, A., Guerchet, M., Ali, G., Wu, Y. T., & Prina, M. (2015). *World Alzheimer Report 2015. The global impact of dementia. An analysis of prevalence, incidence, cost and trends*. Repéré à <https://www.alz.co.uk/research/WorldAlzheimerReport2015.pdf>
- Ranchet, M., Morgan, J. C., Akinwuntan, A. E., & Devos, H. (2017). Cognitive workload across the spectrum of cognitive impairments: a systematic review of physiological measures. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, (80), 516-537.
- Reppermund, S., Brodaty, H., Crawford, J. D., Kochan, N. A., Draper, B., Slavin, M. J., ..., & Sachdev, P. S. (2013). Impairment in instrumental activities of daily living with high cognitive demand is an early marker of mild cognitive impairment: the Sydney Memory and Ageing Study. *Psychological medicine*, 43(11), 2437-2445. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S003329171200308X>
- Robinson, O. J., Vytal, K., Cornwell, B. R., & Grillon, C. (2013). The impact of anxiety upon cognition: perspectives from human threat of shock studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(203). 1-21. doi: 10.3389/fnhum.2013.00203
- Rock, P. L., Roiser, J. P., Riedel, W. J., & Blackwell, A. D. (2014). Cognitive impairment in depression: a systematic review and meta-analysis. *Psychological medicine*, 44(10), 2029-2040. doi:10.1017/S0033291713002535
- Royall, D. R., Lauterbach, E. C., Kaufer, D., Malloy, P., Coburn, K. L., & Black, K. J. (2007). Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association The cognitive correlates of functional status: a review from the Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*, 19(3), 249-265.

- Rubio, S. Diaz, E., Martin, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods. *Applied Psychology, 53*(1), 61-86.
- Salthouse, T. A. (2010). Selective review of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society, 16*(5), 754-760.
- Salthouse, T. A., Berish, D. E., & Siedlecki, K. L. (2004). Construct validity and age sensitivity of prospective memory. *Memory & Cognition, 32*(7), 1133-1148.
- Salthouse, T. (2012). Consequences of age-related cognitive declines. *Annual review of psychology, 63*, 201-226.
- Sayers, H. (2004). Desktop virtual environments: a study of navigation and age. *Interacting with Computers, 16*(5), 939-956.
- Schubert, T., Friedman, F. et Regenbrecht, H. (1999). Decomposing the sense of presence: Factor analytic insights. Extended Abstract to the 2nd International Workshop on Presence, 1-5.
- Ska, B., & Joannette, Y. (2006). Vieillesse normale et cognition. *M/S: médecine sciences, 22*(3), 284-287.
- Sorel, O., & Pennequin, V. (2008). Aging of the planning process: The role of executive functioning. *Brain and cognition, 66*(2), 196-201.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. D. (1970). Test manual for the State Trait Anxiety Inventory. Palo Alto: Consulting Psychologist Press.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and instruction, 4*(4), 295-312.
- Tarnanas, I., Papagiannopoulos, S., Kazis, D., Wiederhold, M., Wiederhold, B., & Tsolaki, M. (2015). Reliability of a novel serious game using dual-task gait profiles to early characterize aMCI. *Frontiers in aging neuroscience, 7*.
- Tarnanas, I., Schlee, W., Tsolaki, M., Müri, R., Mosimann, U., & Nef, T. (2013). Ecological validity of virtual reality daily living activities screening for early dementia: longitudinal study. *JMIR Serious Games, 1*(1). doi :10.2196/games.277
- Thomson, D. R., & Hasher, L. (2017). On the preservation of vigilant attention to semantic information in healthy aging. *Experimental Brain Research, 235*(7), 2287-2300.
- Tomasko, J. M., Pauli, E. M., Kunselman, A. R., & Haluck, R. S. (2012). Sleep deprivation increases cognitive workload during simulated surgical tasks. *The American Journal of Surgery, 203*(1), 37-43.

- Treitz, F. H., Heyder, K., & Daum, I. (2007). Differential course of executive control changes during normal aging. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14(4), 370-393.
- Verhulst, E., Banville, F., Richard, P., Tabet, S., Lussier, C., Massicotte, É., & Allain, P. (2017, July). Navigation Patterns in Elderly During Multitasking in Virtual Environment. In *International Conference on Human Interface and the Management of Information* (176-188). Springer, Cham.
- Verhulst, E., Richard, P., Richard, E., Allain, P., & Nolin, P. (2016, February). 3D Interaction Techniques for Virtual Shopping: Design and Preliminary Study. In *Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 1. (271-279). SCITEPRESS-Science and Technology Publications, Lda.
- Viaud-Delmon (2007). iGrouppresence questionnaire (French translation). Repéré à www.igroup.org/pq/ipq/download.php.
- West, R., & Covell, E. (2001). Effects of aging on event-related neural activity related to prospective memory. *Neuroreport*, 12(13), 2855-2858.
- West, R., Jakubek, K., & Wymbs, N. (2002). Age-related declines in prospective memory: Behavioral and electrophysiological evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(7), 827-833.
- Wilson, B. A., Evans, J. J., Alderman, N., Burgess, P. W., & Emslie, H. (1997). Behavioural assessment of the dysexecutive syndrome. *Methodology of frontal and executive function*, 239-250.
- Zakzanis, K. K., Quintin, G., Graham, S. J., & Mraz, R. (2009). Age and dementia related differences in spatial navigation within an immersive virtual environment. *Medical Science Monitor*, 15(4), 140-150.
- Zhang, L., Abreu, B. C., Masel, B., Scheibel, R. S., Christiansen, C. H., Huddleston, N., & Ottenbacher, K. J. (2001). Virtual reality in the assessment of selected cognitive function after brain injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 80(8), 597-604.
- Zucchella, C., Sinforiani, E., Tassorelli, C., Cavallini, E., Tost-Pardell, D., Grau, S., ..., & Nappi, G. (2014). Serious games for screening pre-dementia conditions: from virtuality to reality? A pilot project. *Functional neurology*, 29(3), 153. Repéré à <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4264781/>