



HAL
open science

Evaluation écologique des troubles de l'apprentissage et de la navigation dans les grands espaces liés au vieillissement : rôle des déclinés mnésiques, exécutifs et du contrôle moteur

Mathieu Taillade

► To cite this version:

Mathieu Taillade. Evaluation écologique des troubles de l'apprentissage et de la navigation dans les grands espaces liés au vieillissement : rôle des déclinés mnésiques, exécutifs et du contrôle moteur. Psychologie. Université Victor Segalen - Bordeaux II, 2012. Français. NNT: . tel-00920503

HAL Id: tel-00920503

<https://theses.hal.science/tel-00920503>

Submitted on 18 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sciences Cognitives

Evaluation écologique des troubles de l'apprentissage et de la navigation dans les grands espaces liés au vieillissement : Rôle des déclinés mnésiques, exécutifs et du contrôle moteur

Présentée et soutenue publiquement

Le 17/12

Mathieu Taillade
Né le 07 septembre 1982 à Chenôve

Membres du Jury :

M. Farid El Massioui

Professeur, Université Paris VIII **Rapporteur**

M. Pierre Feyereisen

Professeur, Université catholique de Louvain **Rapporteur**

M. Bernard N'Kaoua

Professeur, Université Bordeaux Segalen..... **Directeur de thèse**

Mme Hélène Sauzéon

Maître de conférence-HDR, Université Bordeaux Segalen, Inria..... **Co-Directeur de thèse**

Résumé

Depuis plusieurs années, la réalité virtuelle est largement utilisée en neuropsychologie, notamment dans le domaine de l'étude de la cognition spatiale. Son utilisation grandissante a pour but de répondre à la fois au manque de validité écologique des tests classiques et au manque de contrôle des évaluations en conditions réelles. Les études dans le domaine de la cognition spatiale ont permis de montrer la complexité de l'apprentissage et de la navigation dans les grands espaces et suggèrent également une origine cognitive multifactorielle des difficultés de navigation chez les personnes âgées.

Le but de cette thèse sera tout d'abord de vérifier la validité écologique de notre application utilisant la réalité virtuelle par une comparaison directe des performances d'apprentissage et de navigation, entre apprentissages réels et virtuels chez des adultes jeunes et âgés. Il s'agira ensuite de confirmer les hypothèses sur l'origine à la fois mnésique et exécutive des difficultés de navigation liées au vieillissement. Enfin, le rôle du contrôle sensorimoteur dans l'apprentissage de grands espaces, peu étudiée pour le moment dans le cas du vieillissement sera abordé.

A l'aide d'une application en réalité virtuelle, nécessitant de mémoriser un parcours dans un quartier virtuel, réplique d'un quartier de Bordeaux, nous avons étudiés les effets du vieillissement en termes de mémoire spatiale et de performance de navigation. Nous avons comparé directement les apprentissages en conditions réelles et virtuelles, en conditions actives (joystick) et passives, et nous avons mis en relation ces indicateurs avec des mesures neurocognitives et des questionnaires d'estimation des difficultés quotidiennes.

Nos principaux résultats ont permis de montrer un effet négatif de l'âge sur les performances dans notre application avec des patterns équivalents entre apprentissages réels et virtuels chez les jeunes et les âgés. Nous avons obtenu une bonne relation entre les mesures obtenues grâce à notre application virtuelle et les difficultés rapportées par les jeunes mais pas de différences entre jeunes et âgés concernant les difficultés de navigation au quotidien.

Ces résultats confirment la bonne validité écologique de notre application virtuelle chez les personnes âgées et favorisent ainsi l'utilisation de mesures directes de mémoire spatiale et de navigation plutôt que des questionnaires chez les personnes âgées.

Ils ont également permis de montrer de manière directe le rôle des déclinés mnésiques et exécutifs dans leurs difficultés de navigation.

Contrairement à ce qui avait été obtenu chez les jeunes, le contrôle moteur a eu un effet négatif sur les performances de navigation chez les personnes âgées.

Nous discuterons alors les hypothèses neurocognitives concernant l'origine des difficultés de navigation chez les personnes âgées, ainsi que le rôle de la dimension actif (joystick) vs. passif dans les performances de navigation des jeunes et des âgés.

Mots-clés

Cognition spatiale dans les grands espaces, Réalité virtuelle, Vieillissement cognitif, Validité écologique, Déclinés mnésique et exécutif.

Abstract

Since several years, virtual reality is widely used in neuropsychology, especially for the study of spatial cognition. The goal of its use is to respond to the lack of ecological validity of classical tests and to the lack of experimental control of assessments in real situations. The studies in the domain of spatial cognition reveal the complexity of learning and navigation activities in large scales spaces and suggest a multifactorial origin to spatial learning and navigation in older adults.

The aim of this thesis will be first to verify the ecological validity of our virtual reality application, with a direct comparison of spatial learning and navigation performances between real and virtual learning conditions, in young and old participants. Another goal will be to confirm the hypothesis on the role of executive and memory decline in age-related spatial learning and navigation difficulties. Finally, the role of motor control in spatial learning in large scale spaces, which is poorly studied within the framework of aging, will be tested.

With the use of a virtual reality application, requiring memorizing a path in a virtual district replicating a district of Bordeaux, we have studied the effects of aging on spatial memory and navigation performances. We compared real and virtual, active and passive learning conditions and studied the relation between spatial memory and navigation performances with neurocognitive measures and self-report questionnaires on everyday navigation difficulties.

Our main results showed a negative effect of aging on the performances in our application, with pattern of results similar between real and virtual learning conditions in young and old participants. We obtained a good relation between measures from our virtual application and everyday navigation difficulties reported by the young participants but no differences between young and old participants on everyday navigation difficulties. These results confirm the good ecological validity of our virtual application and favor the use of direct navigation and spatial memory measures instead of self-report questionnaires for older adults.

They also showed directly the role of memory and executive decline in older adults' navigation difficulties.

Contrary to the results obtained with the young participants, the motor control had a negative effect on navigation performances in older adults.

We will discuss of the neurocognitive hypothesis already proposed concerning the origin of navigation difficulties due to aging. Also, the role of motor activities and dual-task effect on spatial navigation performances in older adults will be examined.

Key words: Spatial cognition; Virtual reality; Cognitive aging; Ecological validity; Memory and executive decline

Remerciements

Je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué au déroulement de cette thèse.

Je voudrais remercier tout d'abord Mrs El Massioui et Feyereisen qui ont accepté de faire partie de mon jury et d'évaluer ce travail.

Merci également à mes co-directeur Bernard, Hélène qui m'ont conseillé et permis de terminer cette thèse.

Je souhaite aussi remercier Marie, Prashant, Florian, Grégory, Luba et Jérôme qui ont collaboré aux différents travaux ainsi qu'à tous les masters.

Merci aussi à Isabelle pour sa bonne humeur et à Ghislaine pour ses conseils.

Merci à ceux qui m'ont permis de démarrer dans la recherche, notamment Thomas Boraud et Abdelhamid Benazzouz

Merci également à mes parents, frères et sœur, ainsi qu'à toute ma famille de m'avoir encouragé durant ces années.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	3
Remerciements	4
Table des matières.....	5
Table des illustrations.....	8
Table des figures	8
Table des tableaux.....	10
Introduction	11
Chapitre I : Bases théoriques du vieillissement	12
Introduction.....	12
I.1.a. Le processus du vieillissement.....	13
I.2.b. Les manifestations du Vieillesse et le « scénario de la vieillesse	15
I.2.c. L'étude du vieillissement cognitif : principales avancées scientifiques	18
I.2.c.1. Approche de la psychologie cognitive	18
I.2.c.2. Données en provenance des neurosciences	23
I.2.c.3. Approches appliquées ou dites « facteurs humains	26
I.3. Conclusion.....	31
Chapitre II : Cognition spatiale : Bases théoriques et Résultats	32
Introduction.....	32
II.1. Représentations spatiales égocentriques vs allocentriques	32
II.2. Classifications des capacités visuospatiales	33
II.2.a. Distinction Visualisation vs. Orientation spatiale	33
II.2.b. Distinction entre cognition spatiale à petite vs grande échelle	36
II.3. Relations entre cognition spatiale à petite et grande échelle	37
II.4. Cognition spatiale à grande échelle	40
Introduction	40
II.4.a. Niveaux de représentation dans les grands espaces	41
II.4.a.1. Repères (Landmark, en anglais).....	41
II.4.a.2. Route	41
II.4.a.3. Configurationnel (en anglais, « Survey »)	42
II.4.b. Modèles d'acquisition des niveaux de représentations spatiales	42
II.5. Locomotion, Apprentissages « Actif/Passif » et Cognition spatiale	45
Introduction	45
II.5.a. Composantes « motrices » (Intégration de trajet).....	45
II.5.b. Composantes « cognitives ».....	47
II.5.c. Effet double-tâche « contrôle moteur et cognitif »	48
II.5.d. Questions ouvertes	49
II.6. « Wayfinding » : Classifications et stratégies de planification dans les grands espaces.....	50
Introduction	50

II.6.a. Stratégies de navigation et taxonomie des tâches de type « Wayfinding »	50
II.6.b. Stratégies de type « Procédurale » ou basée sur une « Carte Cognitive »	50
II.6.c. Taxonomie des tâches de type « Wayfinding »	51
II.7. Modèles cognitifs de l'activité de navigation	
II.7.a. Burns (1998).....	52
II.7.b. Ishikawa Fujiwara, Imai & Okabe (2008)	53
II.7.c. Bakker (2001).....	53
II.8. Bases neurales de la cognition spatiale dans les grands espaces.....	54
II.9. Conclusion	
Chapitre III : Applications de la Réalité virtuelle dans le domaine d'étude de la cognition spatiale et du vieillissement cognitif.....	57
III.1. Réalité virtuelle et Cognition Spatiale	57
III.1.a. Définitions de la réalité virtuelle	57
III.1.b. Applications	57
III.1.c. Avantages de la RV dans le domaine de la Cognition Spatiale	58
III.1.d. Avancées récentes obtenues grâce à la Réalité Virtuelle	59
III.1.d.1. « Wayfinding » et stratégies de navigation	59
III.1.d.2. Etude des différentes composantes des apprentissages spatiaux « Actif vs Passif » et de l'intégration de trajet	60
III.2. Applications et données à partir de la Réalité virtuelle dans le domaine de la Cognition spatiale et du vieillissement	60
Introduction	60
III.2.a. Cognition spatiale à petite échelle.....	60
III.2.b. Cognition spatiale dans des grands espaces.....	61
III.2.b.1. Mémoire spatiale dans des applications réalistes.....	61
III.2.b.2. Stratégies de navigation.....	63
III.2.b.3. Vieillesse cognitive, navigation et déclin exécutif	64
III.2.b.4. Cognition spatiale et corrélats neuro-anatomiques	65
III.2.b.5. Intégration de trajet et activités sensorimotrices	66
III.3. Conclusion et Perspectives.....	68
Chapitre IV : Problématiques, objectifs et méthodologie générale des travaux	69
IV.1. Problématiques et objectifs	69
IV.1.a. Etude la validité écologique de l'application en réalité virtuelle.....	69
IV.1.b. Rôle des déclin exécutif et mnésiques dans les difficultés de navigation.....	70
IV.1.c. Activité sensorimotrice et apprentissages spatiaux « Actif/Passif » dans le vieillissement	71
IV.2. Méthode générale.....	73
IV.2.a. Participants.....	73
IV.2.a. Quartier virtuel.....	73
IV.2.a.1. Matériel.....	73
IV.2.a.2. Procédure	73

IV.2.b. Evaluations neurocognitives.....	75
IV.2.c. Questionnaires.....	76
Chapitre V: Age-related differences and cognitive correlates of self-reported and direct navigation performance: effect of real and virtual test condition manipulation.....	77
Chapitre VI: Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application	102
Chapitre VII: Age-related wayfinding differences in naturalistic large-scale environments: Detrimental Motor controlling effects are mediated by executive and memory decline?	120
Chapitre VIII: Discussion générale	140
Bibliographie	146
Table des illustrations.....	175
Table des figures	175
Table des tableaux.....	178
Annexes (Manuscrits acceptés ou soumis non présentés dans la thèse)	179

Table des illustrations

Figures

Figure 1: Evolution du nombre (en milliers) de personnes âgées en France et du pourcentage de personnes âgées de plus de 65 ans (par rapport à la population totale) en France de 1950 à 2050.....	12
Figure 2: Illustration de l'hétérogénéité du vieillissement cognitif (données issues de l'étude de Rubin et al., 1998)	14
Figure 3: Facteurs influençant le vieillissement neuro-cognitif en termes de déclin ou de vieillissement réussi (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005)	14
Figure 4: Phasage de la méthode d'analyse des différences liées à l'âge sur la cognition selon Salthouse (2001, 2006)	15
Figure 5: Scénario de la vieillesse	17
Figure 6: Schématisation des modèles structuraux ou hypothèse multiples du vieillissement cognitif.....	19
Figure 7: Corrélations entre mesures perceptives (visuelles et auditives) et mesures cognitives sur deux groupes d'âge (Baltes & Lindenberger, 1997)	19
Figure 8: Lésions de la substance blanche (SB) corrélée au déclin mnésique de la personne âgée.....	23
Figure 9: Schématisation des deux facteurs indépendants (Frontal-Striatal et Medio-Temporal) influençant séparément ou de manière combinée le déclin cognitif associé au vieillissement en termes de dysexécutivité et de déclin mnésique (d'après Buckner, 2004)	24
Figure 10: Théorie neurocognitive du déficit sensoriel et cognitif selon 3 hypothèses (Dennis & Cabeza, 2008)	26
Figure 11a: Nombre d'articles publiés dans Human Factors concernant l'âge ou le vieillissement depuis 2007. (d'après Charness, 2008a)	27
Figure 11b: « Top 10 » des publications (en termes de nombre de citations depuis 2007, et nombre moyen de citations/an) dans « Human Factors » d'après Charness, 2008a)	27
Figure 12: Modèle de l'activité « Personne-Environnement » au niveau individuel et sociétal (selon Carlsson, 2002)	30
Figure 13: Modèle de l'étendue d'utilisation d'un ordinateur avec les coefficients de régression standardisés (d'après Cazaja, et al., 2006)	30
Figure 14: Description et propriétés des représentations spatiales égocentriques (corps-objet) et allocentriques (objet-objet) (Easton & Sholl, 1995)	33
Figure 15: Figures développées pour le test de rotation mentale. Dans la version de Vandenberg, Kuse et Vogler (1978), il faut déterminer parmi les 4 figures de droite, celles qui sont identiques à la figure se trouvant à gauche	34

Figure 16 : Test d'orientation spatiale de Guilford & Zimmerman (Guilford & Zimmermann, 1945)	35
Figure 17 : a - Exemple d'item utilisé pour un test de prise de perspective mentale ; b - Exemple de réponses données pour ce test de prise de perspective mentale (Hegarty & Waller, 2004).....	36
Figure 18 : Représentation schématique des processus nécessaires à l'apprentissage et la navigation dans des grands espaces (Hegarty et al., 2006)	37
Figure 19 : Description des modèles de relations entre les aptitudes à grande et petite échelle (Hegarty et coll., 2006)	38
Figure 20 : (A) Résultat de l'analyse structurale de Hegarty et al. (1996) ; (B) Modèle de dissociation partielle issu de l'analyse structurale.....	38
Figure 21 : Modèle à médiation (analyse de pas) proposé par Allen et al. (1996).	39
Figure 22 : Vue d'ensemble des aptitudes associées à la navigation et l'apprentissage dans des grands espaces (Wolbers & Hegarty, 2010)	40
Figure 23 : Représentation schématique de la hiérarchisation des positions et des connections des routes formant un réseau (Golledge, 1999)	41
Figure 24 : Représentation schématique des prédictions de modèles « dominant » (de Siegel & White, 1975) et « continu » (de Montello, 1998) du développement des représentations spatiales (Ishikawa & Montello, 2006)	43
Figure 25 : Représentation de la « Network of Reference Frame Theory » (Meilinger, 2008)	44
Figure 26 : Tâche de complétion de triangle utilisée classiquement pour l'étude de l'intégration de trajet (Mahmood et coll., 2009)	46
Figure 27 : Représentation schématique de la taxonomie des activités de type « Wayfinding » proposée par Wiener et coll. (2009)	51
Figure 28 : Taxonomie des stratégies de navigation proposée par Arleo & Rondi-Reig (2007)	52
Figure 29 : Modèle de navigation proposé par Burns (1998) s'appliquant à la conduite automobile.....	52
Figure 30 : Représentation schématique du modèle de navigation proposé par Ishikawa, Fujiwara, Imai & Okabe (2008)	53
Figure 31 : Représentation schématique du modèle de navigation et d'orientation spatiale proposé par Bakker (2001)	54
Figure 32 : Modèle schématique d'interaction temporo-pariétale impliqués dans la mémoire spatiale et l'imagerie mentale. (Byrne et al., 2007)	55
Figure 33 : Relation entre validité écologique et contrôle expérimental pour les méthodes traditionnelles (outils classiques de type papier-crayon, informatisés et les dispositifs virtuels (Loomis et al., 1999)	58
Figure 34 : Hôpital virtuel utilisé par Cushman et al., (2008)	63
Figure 35 : Exemple de version virtuelle d'un labyrinthe radiaire utilisé par Etchamendy et al., 2011.....	63
Figure 36 : A- Vue du quartier St Augustin « réel » ; B- Vue de la version virtuelle du quartier St Augustin ; C- Schémas du Parcours utilisé ; D- Vue générale du quartier virtuel.....	74

Tables et tableaux

<u>Tableau 1</u> : Récapitulatif des hypothèses et fait marquants du vieillissement cognitif (d'après Sauzéon, 2010)	23
<u>Tableau 2</u> : Lésions de la substance grise (SG) liées à l'âge prépondérantes sur le cortex frontal, les noyaux gris centraux et l'hippocampe (selon la méta-analyse de Raz, 2000)	23
<u>Tableau 3</u> : Opérationnalisation des patterns d'activation neuro-fonctionnelle en termes d'hypo-/hyper-activation et de niveau de performances atteint (d'après Reuter-Lorent & Listig, 2005)	25
<u>Tableau 4</u> : Récapitulatif de l'activation de la région frontale/préfrontale chez les sujets jeunes et âgés dans diverses tâches cognitives (d'après Cabeza, 2004)	26
<u>Tableau 5</u> : Déclins, difficultés et compensation pour la conduite automobile (d'après Simeos, 2003)	29
<u>Tableau 6</u> : Diversité des facteurs visuo-spatiaux identifiés, utilisant des approches par analyses factorielles (d'après Hegarty & Waller, 2005)	34
<u>Tableau 7</u> : Résumé des études portant sur les corrélations entre les aptitudes spatiales à petite et à grande échelle (Hegarty & Waller, 2005)	36
<u>Tableau 8</u> : Récapitulatif des études sur le rôle des informations idiothétiques (copies efférentes motrices, infos proprioceptives et vestibulaires) dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale	48
<u>Tableau 9</u> : Récapitulatif des études sur le rôle des copies efférentes motrices, dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale	48
<u>Tableau 10</u> : Avantages de la réalité virtuelle dans la rééducation cognitive (d'après Shulteis et Rizzo, 2001)	58

Introduction

Dans le domaine de la neuropsychologie, l'utilisation de la réalité virtuelle a connu un essor très important dans différents domaines de la neuropsychologie (mémoire, fonctions exécutives, cognition spatiale...) que ce soit pour l'évaluation ou la réhabilitation.

Les avantages proposés par l'utilisation de la réalité virtuelle sont diverses. Elle permet notamment, une simulation des situations rencontrées au quotidien et donc une évaluation plus écologique et réaliste des difficultés rencontrées par les personnes atteintes de troubles cognitifs (Loomis, Blascovich & Beall, 1999). Elle permet également un meilleur contrôle expérimental et une meilleure implication des participants (Rizzo, Schultheis, Kerns & Mateer, 2004). On peut également noter d'autres applications comme le couplage entre imagerie fonctionnelle et navigation dans des environnements virtuels. La diversité des interacteurs (joysticks, tapis roulants...) et interfaces (écran, visuo-casque...) a également permis des avancées concernant le rôle des informations sensorimotrices dans la cognition spatiale dans les grands espaces (Chrastil & Warren, 2012).

Dans le domaine des troubles cognitifs et du handicap lié au vieillissement, on a pu aussi constater de nombreuses applications dans différents domaines (mémoire épisodique, fonctions exécutives, fonctions visuospatiales et activités quotidiennes).

Les applications dans le domaine de la cognition spatiale ont permis de suggérer une origine multifactorielle des difficultés de navigation au quotidien. Les déclinés mnésiques, exécutifs, ainsi que des difficultés touchant l'intégration des informations sensorimotrices sont les principales hypothèses proposées (Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010 ; Klencken, Després & Dufour, 2012).

Dans cette thèse, trois principaux domaines seront abordés. Tout d'abord la vérification de la validité écologique de notre application utilisant un quartier virtuel chez les personnes âgées. En effet, ce contrôle est rarement effectué dans les études utilisant la réalité virtuelle et encore plus dans le cas du vieillissement. Dans toutes les études passées en revue, seules quelques unes ont effectué une comparaison directe entre performances obtenues en conditions virtuelles et réelles et aucune n'a réalisé de comparaison entre mesures directes et auto-estimation des difficultés rencontrées au quotidien. Cette comparaison, qui fera également l'objet de notre travail, est pourtant extrêmement pertinente dans la mesure où l'un des objectifs de la réalité virtuelle est de montrer que les difficultés qu'elle permet de déceler sont plus en lien avec la plainte du sujet que ne le sont les résultats des tests psychométriques classiques.

Le second domaine abordé concerne la question du rôle des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation chez les personnes âgées. Leurs rôles ont été évoqués par certains auteurs en se basant sur des données de quelques études utilisant le couplage imagerie fonctionnelle et navigation dans des environnements virtuels. Une seule étude a analysé les corrélations entre performances de navigation et mesures neurocognitives sensibles aux fonctions mnésiques et/ou exécutives mais a utilisé un environnement peu réaliste (Moffat, Kennedy, Rodrigue & Raz, 2007). Nous aborderons donc la question des déclinés cognitifs sous-tendant les difficultés de navigation des âgés dans un environnement réaliste beaucoup plus proche des environnements de la vie quotidienne.

Le dernier thème abordé sera celui du rôle du contrôle moteur dans les apprentissages et la navigation dans les grands espaces. Par contrôle moteur, nous entendons essentiellement le déplacement à l'aide d'un joystick durant l'apprentissage du trajet. Ce domaine a été largement étudié chez les jeunes, notamment grâce à la réalité virtuelle (Chrastil & Warren, 2012), mais les études restent peu nombreuses chez les personnes âgées. Les données chez les jeunes ont montré des résultats contradictoires, probablement dû à des différences de protocole, de dimensions des environnements et de définition de la navigation active (motrice et/ou cognitive). Une meilleure compréhension des effets de la dimension actif/passif sur les performances d'orientation des sujets jeunes et âgés sera l'objet de la dernière partie de notre thèse.

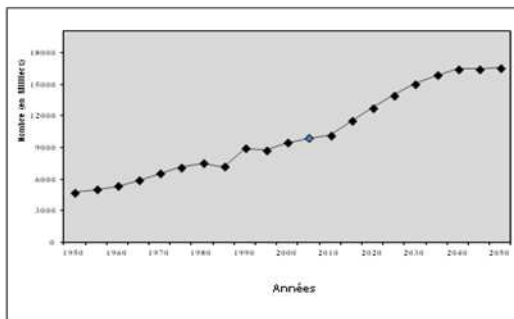
Chapitre I : Bases théoriques du vieillissement

Résumé : Nous proposons, dans ce chapitre, d'exposer, sur une courte échelle de temps de 60 ans, les importants progrès réalisés tant sur le plan de la validité empirique et formelle des théories du vieillissement neurocognitif que sur le plan de leur réalité écologique: les mécanismes neurocognitifs favorisés et défavorisés par l'âge, les activités impactées et le constat de bénéfices réels d'un entraînement cognitif.

I. Introduction

Depuis une soixantaine d'années, les travaux scientifiques sur les problèmes de la vieillesse ne cessent de croître, et de nombreuses revues, instituts ou laboratoires de recherche y sont tout spécialement consacrés. Cette évolution répond à l'intérêt scientifique que soulève le vieillissement, mais surtout à la préoccupation sociétale liée au vieillissement démographique des populations occidentales due au relèvement de l'espérance de vie et à la baisse de fécondité (Fig. 1). Depuis 1950, le nombre de personnes âgées n'a cessé d'augmenter en France, passant de 4 762 000 en 1950 à 9 461 000 en 2000 pour être environ à 16 529 000 en 2050 (données projetées). Les personnes âgées de 65 ans ou plus représentaient 11.4% de la population française en 1950 et 16% en 2000. En 2050, elles représenteront environ 26.7% sur une population totale anticipée d'environ 62 millions (contre 41 millions en 1950 et 59 millions en 2000).

Evolution du nombre (en milliers) des + de 65 ans en France de 1950 à 2050



Evolution du pourcentage des + de 65 ans en France de 1950 à 2050

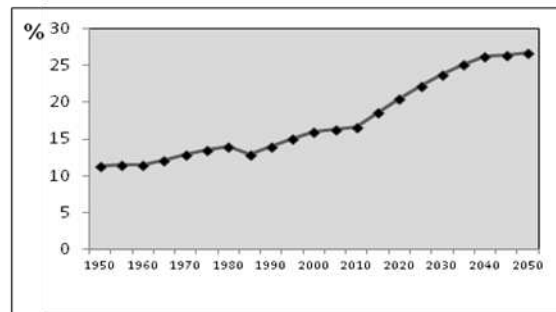


Figure 1: A gauche, Evolution du nombre (en milliers) de personnes âgées en France de 1950 à 2050 ;

A droite, Evolution du pourcentage de personnes âgées de plus de 65 ans (par rapport à la population totale) en France de 1950 à 2050.

Source: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2000 Revision and World Urbanization Prospects: The 2001 Revision, <http://esa.un.org/unpp>

La problématique du vieillissement des populations est un enjeu dans tous les domaines : économiques, politiques et de santé publique. De manière générale, elle pose le problème spécifique du traitement socio-économique de la vieillesse (avec notamment, le maintien de la prospérité économique, le rapport actif/inactif, le financement des retraites, l'allocation dépendance, etc.) et au niveau de la santé publique, elle impose le devoir de déployer les efforts nécessaires pour assurer à nos anciens, une vieillesse réussie, c'est-à-dire, tant que faire se peut, « un état de bien-être physique, mental et social » (Définition de la santé par l'OMS, 1946) et des mesures sociétales contournant le handicap (CIFSH, 2001, Classification internationale du Fonctionnement Humain, du handicap et de la Santé – en France, loi du 11 février 2005).

Depuis le rapport Laroque en 1962 sur les problèmes de la vieillesse en France, une politique de maintien à domicile de la personne âgée est développée en réponse à l'unanime conclusion livrée par les enquêtes : constat social (tous les groupes sociaux et en particulier les âgés, sont réfractaires à l'institutionnalisation), constat de santé (le vieillissement est mieux réussi au domicile qu'en institution) et constat économique (le coût financier en institution excède celui supporté au domicile).

Grâce aux efforts soutenus par les collectivités locales et territoriales, au niveau des services de maintien à domicile (eg., services de soutien social : clubs, foyers, restaurants, sport, université des aînés, etc.) ou des services de prise en charge médicale (soins, hospitalisation et garde à domicile, hospitalisation de jour, etc.), ou encore des assistances technologiques en plein essor (ordinateur, domotique, e-santé, prothèse-wares informatiques, robotique, téléphonie, etc.), plus de 90 % des personnes âgées vivent aujourd'hui à domicile (INSEE, 2009).

Si l'on peut se satisfaire des résultats de cette politique du maintien à domicile, les données épidémiologiques et, en particulier, l'incidence et la prévalence de pathologies neuro-dégénératives telles que la Démence de Type Alzheimer (DTA) rendent ce bilan moins réjouissant (eg., la prévalence d'une DTA à 65 ans est à 0.6% et passe à 20% chez les plus de 90 ans ; 1 démence sur deux n'est pas diagnostiquée compte tenu de l'absence de marqueurs sanitaires suffisamment fiables, Amouyel, 2008).

I.1.a. Le processus du vieillissement

Définir le processus de vieillissement est un exercice complexe. Pour la clarté du propos, il nous paraît utile 1) d'en poser une définition théorique générale, et 2) d'en présenter les principales manifestations à travers plusieurs facettes susceptibles d'en appréhender sa globalité, qui aboutit à la vieillesse, voire à la dépendance.

Depuis la publication de l'ouvrage "Problems of Aging" de Cowdry (1939) et sous l'impulsion du courant allemand avec la théorie bio-culturelle (Baltes et ses collaborateurs, 1987, 1997, 1999, 2006), le vieillissement est abordé dans une perspective développementale : l'enfant naît "incomplet", le vieillard meurt "incomplet". La sénescence est programmée génétiquement, et la longévité de l'homme est le produit d'ajustement de mécanismes de maintenance largement conditionnés par l'environnement (pour revue, McGue & Johnson, 2008) : de bonnes conditions environnementales repoussent les limites du vieillissement sans toute fois lui ôter son caractère génétiquement inéluctable.

Précisément, la définition du processus de vieillissement repose sur deux notions clés : celle *d'homme en développement*, et celle *d'équilibre des gains et des pertes*. Ces deux notions s'articulent pour rendre compte des effets du vieillissement, en termes, d'une part, de continuité, et d'autre part, de transformation positive et/ou négative. Les pertes et les gains refléteraient l'activité de « balances régulatrices » permettant tout au long de la vie le maintien de l'homéostasie de l'organisme (au sens de Claude Bernard) [Emerson R.W., 1900]. Toute perte, tout déficit donnerait naissance à des efforts innovants, et inversement, tout excès provoquerait un déficit.

Cette définition du processus de vieillissement délimite alors deux grandes périodes liées à la rupture de l'équilibre des gains et des pertes [Baltes, 1999] :

- La croissance et la "maturescence", c'est à dire la période de développement de l'homme où la production et le renouvellement des gains sont supérieurs aux pertes ;
- La sénescence ou la période de la "vieillesse", où les renouvellements de l'organisme sont insuffisants et engendrent une déficience fonctionnelle non remédiée par les stratégies adaptatives phylogénétiques et ontogénétiques (ie., supériorité des pertes).

Le vieillissement n'est donc pas un processus linéaire d'usure se déroulant uniformément, mais un processus en "cascade", irrégulier et multiforme, provoquant des "chutes" et des "rebonds". Il n'y a pas un vieillissement mais des vieillissements qui s'exercent à différents niveaux sans pour autant être uniformes. Chaque population cellulaire, chaque organe, ou encore chaque fonction physiologique jouit d'une dynamique propre de vieillissement. Au niveau psychologique, les

changements de performance associés au vieillissement sont sélectifs, rapides et/ou lents, c'est à dire plus accentués pour certaines fonctions (e.g., l'attention, la mémoire, le contrôle exécutif) que pour d'autres (e.g., le langage, les praxies, les gnosies) (Fig. 2, panel gauche).

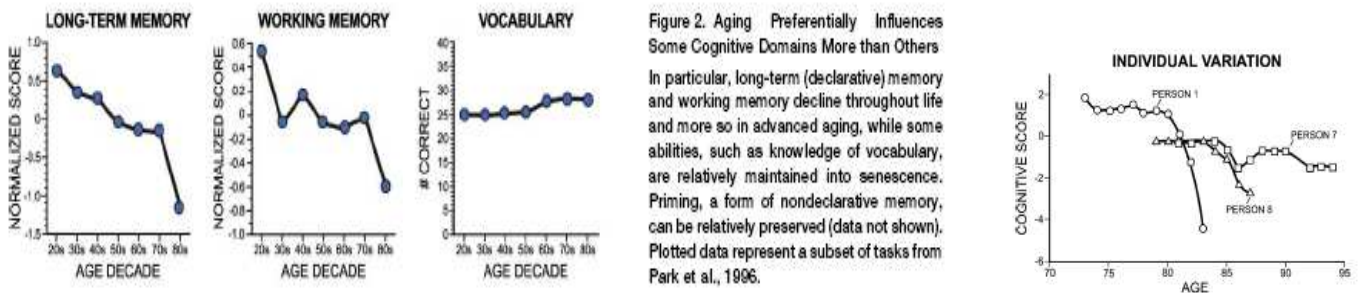
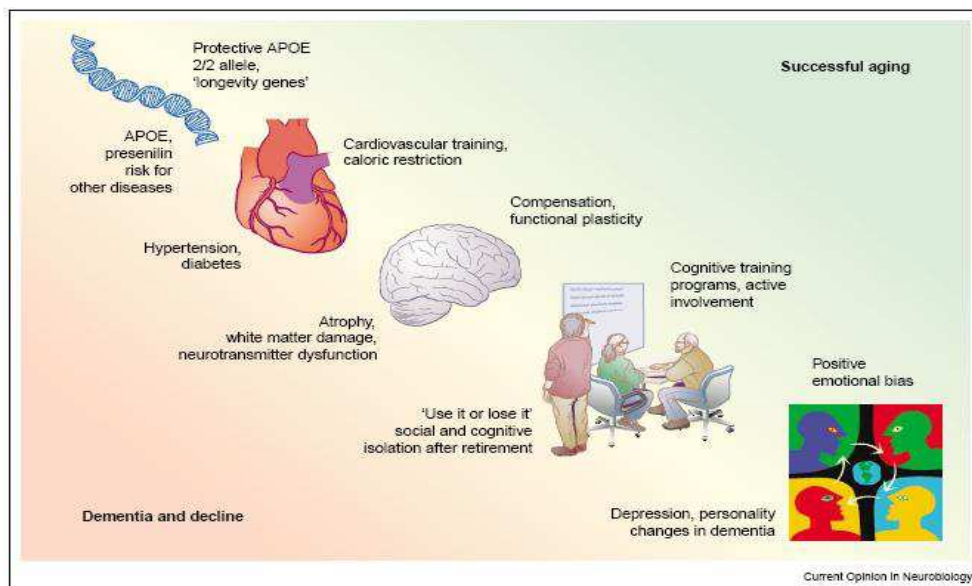


Figure 2 : *A gauche*, illustration de l'hétérogénéité du vieillissement cognitif mesuré ici avec des tests de mémoire à long-terme, de mémoire de travail et de vocabulaire (Park, et al., 1996) ;

A droite, illustration de la variabilité interindividuelle sur un score composite général d'efficacité cognitive prélevé sur 3 personnes âgées et de la variabilité intra-individuelle dite « occasionnelle », et notamment pour la personne « 7 » dont les scores fluctuent selon les occasions d'évaluations (données issues de l'étude de Rubin et al., 1998).

A cette conception multiforme du vieillissement s'ajoutent l'augmentation avec l'âge de la variabilité inter- et intra-individuelle mais aussi l'augmentation de la variabilité intra-individuelle dite « occasionnelle » (pour revue Hultsch, MacDonald, & Dixon, 2002) (Fig. 2, panel droit).

La grande variabilité du vieillissement serait le témoin d'une capacité de « réserve », inégale d'un individu à un autre ou d'une fonction à l'autre pour un individu donné mais déterminante pour une « vieillesse réussie » (voir la théorie bio-culturelle de l'école allemande), [Baltes et al., 1987-2006]. La capacité de réserve serait la résultante de facteurs biopsychologiques déterminés génétiquement et environnementalement (Albert et al., 1995 ; pour revue, Vogler, 2006 ; McGue & Johnson, 2008), et en particulier ceux ayant une influence sur l'expression des gènes APOE (Apolipoprotéine E), sur le fonctionnement cardio-vasculaire, la plasticité cérébrale et l'activité socio-cognitive de l'individu (Fig. 3).



Factors influencing neurocognitive aging. The figure illustrates several factors influencing whether aging will be successful or lead to impairment. This list is not intended to be comprehensive but instead summarizes factors of recent interest that are highlighted in the text. Abbreviations: APOE, apolipoprotein E.

Figure 3 : Facteurs influençant le vieillissement neuro-cognitif en termes de déclin ou de vieillissement réussi (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005)

Les multiples facettes du vieillissement ainsi que sa variabilité ne sont pas sans poser problème, et notamment sur les choix des plans expérimentaux (transversaux vs. longitudinaux) (Schmiedek and Li, 2004 ; pour revue, Hofer & Sliwinski, 2006), les stratégies d'investigations et les outils statistiques à privilégier (pour revue, Hultsch et al., 2008). Par exemple, Salthouse (2001, 2006) propose d'améliorer les études transversales en optant pour une méthode en 5 étapes comme illustré en Figure 4.

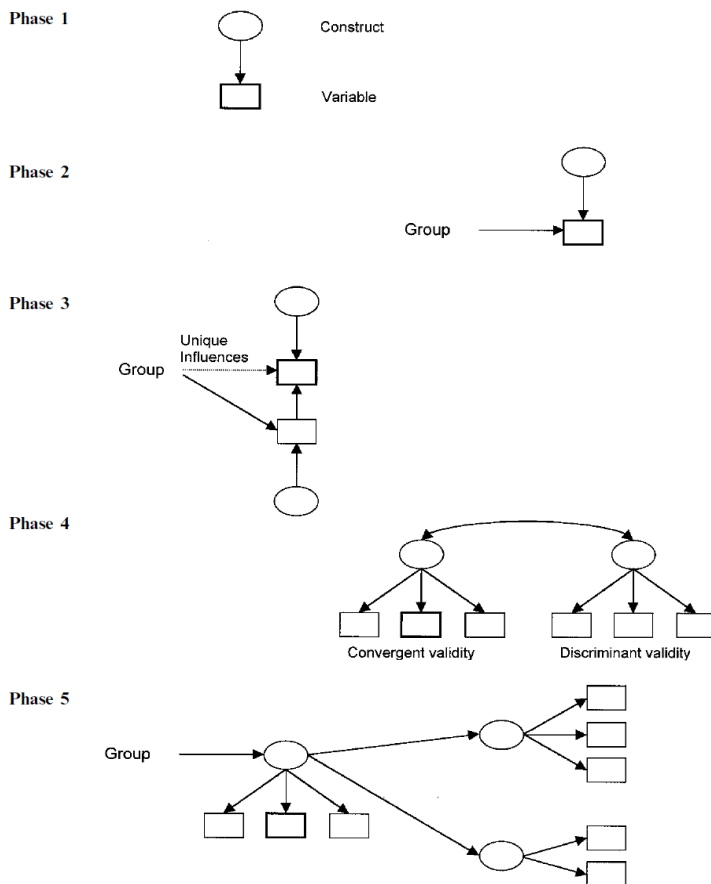


Figure 4: Phasage de la méthode d'analyse des différences liées à l'âge sur la cognition selon Salthouse (2001, 2006).

Etape1: Spécification théorique et hypothèse opérationnelle sur une variable observée « cible »

Etape2: Examen des différences liées à l'âge sur la variable observée « cible »

Etape 3 : Examen de l'indépendance de l'effet de l'âge sur la variable « cible » (Examen des différences liées à l'âge sur d'autres variables observées en lien avec la variable « cible »)

Etape 4 : Examen de la validité convergente et discriminante de la variable observée « cible » (ie, examen des inter-corrélations)

Etape 5 : Examen de la centralité de la variable « cible » dans les différences liées à l'âge (ie., Arbre causal)

Ainsi, l'hétérogénéité de la sénescence fait du vieillissement un objet d'étude complexe, où son appréhension scientifique requière la maîtrise des savoirs et méthodes d'investigation des phénomènes complexes.

1.2.b Les manifestations du Vieillissement et le « scénario de la vieillesse

Dans une approche comportementale large, les manifestations du vieillissement couvrent trois grands domaines inter-reliés : le psycho-relacionnel, le sensori-moteur, et le cognitif. Ces manifestations permettent alors de décrire le statut fonctionnel de la personne âgée (Charness, 2008a), en termes de :

- **Statut psycho-relacionnel** : avec l'âge, se produit une modification de certaines dimensions de la personnalité (anxiété et neuroticisme, extraversion, hostilité, tolérance, dépression, etc.) (Mroczek, Spiro & Griffin, 2006) et une réduction des réseaux socio-relacionnels et des compétences communicatives, pouvant aller jusqu'à l'isolement social, et aux difficultés psycho-affectives (Aldwin, Spiro & Park., 2006).

- **Statut perceptivo-moteur** : il se caractérise le plus souvent par les signes sensoriels et moteurs suivants :

- *des troubles visuels* (voir, Schieber, 2006), tels que la diminution de la vision fovéale, (opacification de la cornée), les difficultés de discrimination des couleurs vert-bleu-violet, les troubles de la perception de la profondeur, de l'adaptation à l'obscurité, et le besoin de

lumière pour une meilleure acuité visuelle, obligent une correction par des lunettes chez 95 % des plus de 65 ans (Mancil et al., 1988 ; Yetka et al, 1998). Par contre, la vision 3D est stable bien au-delà de 65 ans (Whitbourne, 1998).

- *des troubles auditifs*, (perte de perception des sons de hautes fréquences et sensibilité au masquage sur la perception de la parole) (Whitbourne, 1998)

- *des troubles vestibulo-cerebelleux* (vertige, nausées, faibles inputs proprioceptifs, et troubles de l'équilibre) qui participent largement au risque de chute chez la personne âgée (Toglia, 1975 ; Anderson et al., 1995)

des troubles moteurs et notamment musculo-squelettiques (arthrite, diminution de la masse et de la force musculaire, de la souplesse, et de la coordination des mouvements , augmentation de la vitesse d'exécution des mouvements, diminution des capacités de recrutement des unités motrices, rigidité articulaire, motricité fine diminuée) (Newell, Vaillancourt, & Sosnoff, 2006) rendent les fonctions de locomotion et d'appréhension motrice plus lentes et moins précises chez les âgés et ceci d'autant plus que la tâche motrice est complexe .

- **Statut cognitif**, comme le déclin cognitif et le changement de styles cognitifs (eg., un « locus of control » plus externe ou encore une dépendance à l'égard du champ plus importante; Rogers, 1997) associé au vieillissement qui entraîne l'observation courante selon laquelle les personnes âgées ont plus de difficultés en temps et en qualité à acquérir de nouveaux apprentissages mais aussi à réaliser les tâches complexes mêmes courantes (eg., conduite automobile). Le déclin cognitif concerne particulièrement 4 grandes fonctions :

- **Capacités visuo- spatiales** : Essentielles à nos activités quotidiennes (conduite automobile, navigation, et activités instrumentales), elles se définissent comme la capacité à générer une représentation ou une carte mentale 2D ou 3D d'un espace défini (Carpenter & Juste, 1986 ; Kolb & Wishaw, 1990), incluant la perception spatiale, l'orientation spatiale, et la visualisation-rotation mentale. *Dans le vieillissement normal*, est rapporté un déclin de ces capacités (Jacewicz & Hartley, 1987 ; Dollinger, 1995 ; De Beni et al., 2006), et plus particulièrement chez la femme (Dobson et al. 1995) (voir Chapitre 3, Partie « Vieillesse, Cognition Spatiale et Réalité Virtuelle »)
- **Attention sélective visuelle** : Elle correspond au mécanisme d'attention permettant de focaliser les ressources cognitives sur des informations dignes d'intérêt tout en inhibant les informations non pertinentes pour la tâche. Le modèle neuropsychologique d'attention sélective de Posner (1994) propose de différencier les mécanismes d'orientation/recherche attentionnelles, les mécanismes d'engagement attentionnel et ceux de désengagement attentionnel. *Pour l'effet du vieillissement normal*, un déclin de l'attention est observé incluant une réduction du champ attentionnel (Owsley et al., 1991 ; Pringle et al., 2004) et un ralentissement des mécanismes d'orientation et de recherche attentionnelle (Greenwood & Parasuraman, 1999). Et, les âgés ont des performances moindres comparées à celles des jeunes sur des tâches d'attention sélective ou d'inhibition (Chao & Knight, 1997 ; voire également McDowd, 1997 pour revue ; Mani et al., 2005 ; Andrés et al., 2006).
- **Mémoire Episodique** : Elle est définie comme la mémoire à long terme des événements, c'est-à-dire des informations indexées spatio-temporellement dans un contexte (Tulving, 2002). Cette fonction est couramment évaluée à l'aide de tâches différées de rappel (libre ou indicé) ou de reconnaissance d'informations préalablement étudiées. *Concernant le vieillissement normal*, les difficultés de mémoire épisodique sont couramment observées, et ces difficultés sont majorées lorsqu'elles s'inscrivent dans des activités prospectives (ie. se souvenir d'actions futures à réaliser) (McDaniel et al., 2008, pour revue).
- **Fonctions exécutives** : Elles sont définies comme les processus qui contrôlent et régulent les activités cognitives, et notamment pour l'exécution et le contrôle de comportements finalisés dans les situations complexes et nouvelles (ie., lorsque les habiletés cognitives surentraînées ne sont pas suffisantes) (Norman & Shallice, 1986 ; Dubois et al., 1994 ; Rabbit., 1997 ; pour une revue en français voir Meulemans , Collette & Van der Linden, 2004). Il s'agit donc d'un ensemble de ressources indispensables à la production de réponses adaptées dans une large

gamme de fonctions cognitives (mémoire, langage, résolution de problèmes, etc.). Ainsi, le concept de fonctions exécutives est spécifiquement utilisé pour décrire certaines activités cognitives incluant : l'adaptation à la nouveauté, la planification et la mise en œuvre de nouvelles stratégies, le contrôle et la régulation de l'action, la capacité à tenir compte de l'information en retour pour ajuster et adapter la réponse, la capacité d'inhibition des informations non pertinentes à la tâche, etc.

Pour certains auteurs, le déclin cognitif lié à l'âge peut être assimilé à un déclin sélectif des fonctions exécutives citées ci-avant (pour revue, Braver & West, 2008 ; en français, voir Lemaire et Behrer, 2005) amenant le sujet âgé à être en difficultés sur les praxies complexes dites exécutives mobilisées quotidiennement dans diverses activités (navigation ambulatoire, conduite automobile, faire ses courses, etc.) (Boulanger et al., 2006; Sjölander et al., 2005 ; Liu et al., 1999 ; Lee, Lee & Cameron, 2003 ; Shechtman et al., 2007).

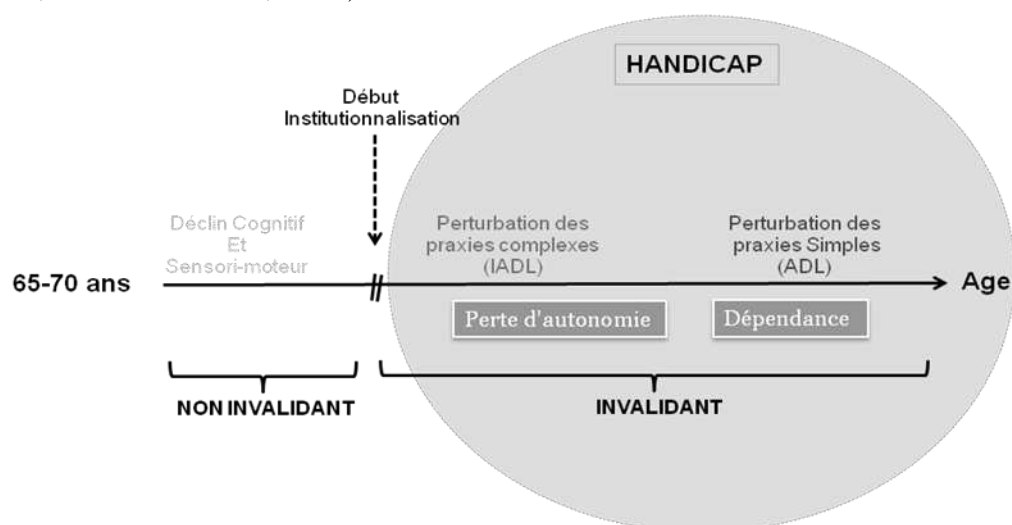


Figure 5 : Scénario de la vieillesse

L'ensemble de ces manifestations du vieillissement, et leurs aggravations avec l'avancée en âge conduisent souvent au « scénario de la vieillesse » (Fig. 5) avec trois périodes délimitées chronologiquement :

- la « jeune vieillesse » ou 3^{ème} âge (les 65–74 ans) où les déclins occasionnés par le vieillissement sont peu invalidants en termes d'incidences sur les activités quotidiennes,
- la « vieillesse moyenne » ou 4^{ème} âge (les 75–84) où les effets du vieillissement affectent les activités instrumentales complexes appelées également praxies exécutives (selon l'échelle de IADL-E, Guelfi 1996 : faire ses courses, utiliser des technologies comme le téléphone, préparer les repas, gérer ses finances, ...), on parle alors de « perte d'autonomie » ;
- la « grande vieillesse » ou 5^{ème} âge (les plus de 85 ans) où les déclins sont envahissants et concernent alors les activités relatives aux praxies de bas niveau (selon l'échelle de ADL-E, Guelfi 1996 : l'habillage, la toilette, etc.) conférant à la personne le statut de « dépendant ».

Dans les deux derniers cas, perte d'autonomie et dépendance, les troubles sont invalidants, c'est à dire génèrent des incapacités, et font entrer la personne âgée dans la sphère du handicap (Fig. 5). Remarquons l'arbitraire de ces 3 périodes de la vieillesse qui se justifie plus par des événements socio-normatifs comme l'âge de la retraite (en France aux alentours de 65 ans) ou encore l'âge moyen de l'institutionnalisation (en moyenne 85 ans en France) que par des études objectivant ce scénario. Là encore, la grande hétérogénéité qui caractérise le vieillissement confère à ce scénario plus une valeur heuristique qu'une réalité.

I.2.c. L'étude du vieillissement cognitif : principales avancées scientifiques.

Afin de positionner nos travaux dans l'histoire de l'étude du vieillissement cognitif, nous exposons ici les avancées scientifiques reconnues dans le domaine depuis les six dernières décennies. Puis, nous concluons sur les grandes voies d'investigation qui en découlent aujourd'hui.

Depuis les années 50, les avancées du domaine relèvent plus des recherches fondamentales qu'appliquées (Charness, 2008a). En effet, jusque dans les années 90, les recherches sont essentiellement fondamentales et empiriques. Elles visent à isoler les grands déterminants du vieillissement cognitif et les relations qu'ils entretiennent notamment, grâce aux nouveaux outils statistiques de modélisation de phénomènes complexes (eg. équations structurelles ; régressions hiérarchiques) (eg., Lemaire & Behrer, 2005 ; Schmiedek & Li et al., 2004). Avec l'arrivée des techniques d'imagerie neuro-fonctionnelle dans les années 90, les connaissances fondamentales du vieillissement s'étaient de corrélats neuraux (pour revue, Dennis & Cabeza, 2008). On parle alors de vieillissement neuro-cognitif, et les théories du vieillissement gagnent encore en validité empirique.

Avec le développement des outils de modélisation informatique, les approches empiriques sont alors complétées par des investigations computationnelles et neuro-computationnelles (pour revues, Kramer et al., 2006 ; Wenger & Schuster, 2007). Les théories du vieillissement gagnent en validité formelle. Ainsi, la meilleure compréhension d'aujourd'hui du vieillissement cognitif tient pour une large part à une recherche fondamentale qui a été à la fois consistante et transdisciplinaire.

Depuis les années 2000, ce sont les études appliquées qui connaissent un essor considérable, avec notamment, l'arrivée des technologies de simulation 3D d'environnements offrant les moyens d'investigation de situations proches du réel et en limitant les inconvénients (sécurité, coût, etc.), et de manière plus générale, avec l'essor des géronto-technologies, et en particulier, celles relatives à l'évaluation, le monitoring du statut cognitif de la personne âgée ou l'assistance cognitive (Bouma et al., 2007).

I.2.c.1. Approche de la psychologie cognitive

Sur ces dernières années, *en psychologie cognitive*, l'avancée la plus significative est la formulation de la théorie bio-culturelle de Baltes qui a permis d'arriver à la définition développementale actuelle du vieillissement qui articule les deux notions que nous avons vues, celles d'homme en développement et d'équilibre gains/pertes, et met en avant la notion de « vieillissement réussi » via l'existence de mécanismes régulateurs. Cette théorie offre une compréhension systémique du vieillissement cognitif et unifie les approches et travaux précédents, ce qui lui confère une grande puissance explicative. Pour ses travaux remarquables, Baltes recevra en 1997 à Dublin le prix Socrates lors du Congrès Européen de Psychologie.

La théorie bio-culturelle

D'abord, la théorie bio-culturelle s'est construite en se nourrissant des faits marquants issus des approches déficitaires développées dans les années 80 autour de l'hypothèse du ralentissement généralisé (Birren et al., 1980 ; Cerella, 1985 ; Salthouse, 1985 ; 1996a) et de l'hypothèse d'une réduction des ressources cognitives (Welford, 1964, Hasher & Zack, 1979 ; Salthouse, 1988, Rabbit, 1990), qui elle-même, est à l'origine du succès des hypothèses à double processus. Ces dernières proposent une classification à deux compétences ou à deux types de processus pour contraster les fonctions préservées et les fonctions déclinantes avec l'âge (Tableau 1). Et, dans les années 90, ces explications sont mises en relation les unes avec les autres. Les modèles structuraux apparaissent alors pour décrire les *hypothèses multiples du vieillissement*, et ce, grâce à

l'introduction de méthodes statistiques plus sophistiquées qui établissent les liens entre les différents modèles déficitaires (eg., Salthouse & Babcock, 1991 ; Park et al., 1996; Fig. 6).

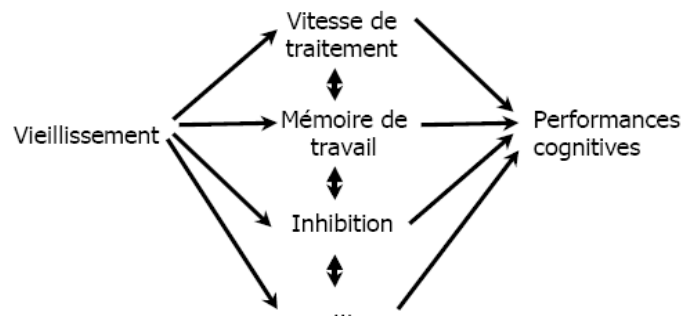


Figure 6 : Schématisation des modèles structuraux ou hypothèse multiples du vieillissement cognitif

Baltes en 1993 proposera de qualifier les processus sensibles au vieillissement de *processus biologiques* (vitesse de traitement et ressources cognitives) et de nommer les processus peu sensibles ou s'améliorant avec l'âge de *processus « culturels »* ou de « pragmatics ».

La théorie allemande s'ancre dans les modèles développementaux dits « *lifespan* -vie entière » en intégrant notamment le modèle de Kaussler (1991) attribuant à la vieillesse le stade de la différenciation, c'est-à-dire le retour à une compétence unique et générale (ie., en opposition à la forte spécialisation des fonctions cognitives au stade adulte). Ce modèle propose que la vieillesse se caractérise par un fonctionnement cognitif plus systémique que modulaire (au sens Fodorien, 1983), et la présence de corrélations fortes entre les dysfonctionnements perceptifs et cognitifs chez les âgés en serait une des démonstrations (Lindenberger & Baltes, 1994 ; 1997) (Fig. 7).

Aussi, en postulant l'existence de mécanismes régulateurs des pertes cognitives, la théorie bio-culturelle s'est inspirée des approches développementales reposant sur l'*hypothèse d'une réserve cognitive* (Stern et al., 1995 ; Stern, 2002) ou encore les approches compensatoires avec l'*hypothèse d'une plasticité cognitive limitée* illustrée notamment par le modèle environnemental de compensation (Bäckman & Dixon, 1992 ; 1995 ; Dixon, Garrett & Bäckman, 2005) ou le modèle « Remédiation-Compilation » de Salthouse (1998, 2003) (Tableau 1).

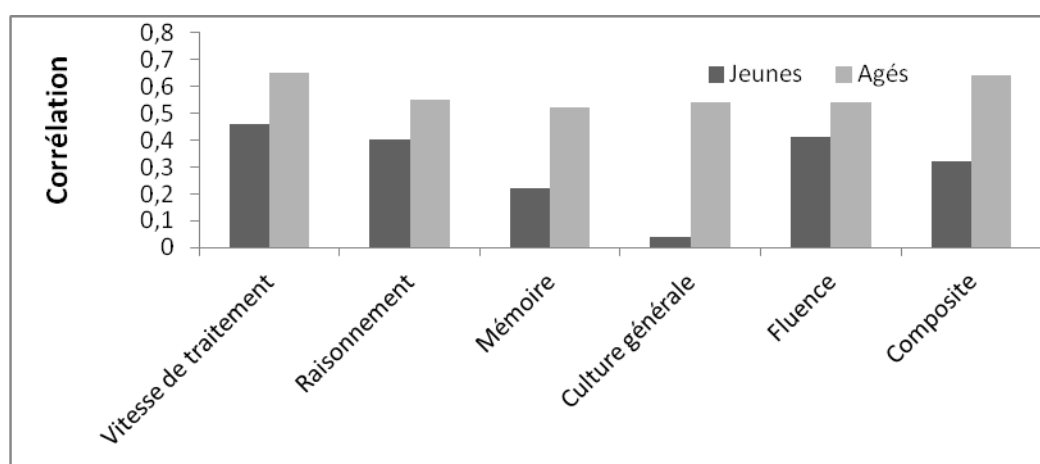


Figure 7 : Corrélations entre mesures perceptives (visuelles et auditives) et mesures cognitives sur deux groupes d'âge (Baltes & Lindenberger, 1997).

Selon la théorie bio-culturelle, les processus cognitifs "culturels" ont pour rôle d'assurer la maintenance des capacités cognitives jusqu'à un âge très avancé. Jusqu'à 70 ans (approximativement), les processus culturels s'adaptent à la déficience des processus biologiques,

c'est à dire qu'ils pallient les pertes cognitives produites par la dégradation des processus biologiques. Au-delà de 70 ans, le dysfonctionnement biologique général est trop important et dépasse les compensations ou optimisations induites par les processus culturels (ie., réserve cognitive et neuro-plasticité limitées). L'adaptation aux pertes est alors de plus en plus partielle. Cet âge est donc la limite des ré-équilibrations possibles. Après 70 ans, les sujets perdent progressivement les fonctions cognitives selon un gradient de complexité où la perte des fonctions de haut niveau (e.g. fonctions exécutives, mémoire) devance celle des fonctions de bas niveau (e.g., fonctions sensori-motrices). Le sujet très âgé se caractériserait alors par une forme radicale d'incomplétude structurale du système cognitif qui peut aboutir à une démence sénile (Baltes et al., 1992; Mayer & Baltes, 1996).

En 1999, Baltes et ses collaborateurs soulignent qu'il reste encore à établir des indicateurs fiables traduisant l'activité des processus biologiques et culturels. Et, la réponse à ce défi scientifique sera en grande partie trouvée dans le champ des neurosciences comportementales.

Date	Auteurs	Hypothèse	Faits marquants de la psychologie cognitive du vieillissement
<i>Modèle Déficitaire à double compétences/processus</i>			
1964	Welford	Réduction des ressources cognitives	Performance très réduite sur les tâches d'attention divisée (Welford, 1964) ; Brinley (1965) montre une relation linéaire élevée ($r=0.90$) entre les performances en RT des sujets jeunes et des sujets âgés. Effet complexité de la tâche démontré sur des tâches requérant l'exécution simultanée et/ou séquentielle de plusieurs opérations cognitives (Salthouse, 1985). Les différences liées à l'âge sont augmentées en situation de double tâche (Wright, 1981, Craik & McDowd, 1987).
1965	Rabbitt	Déficit attentionnel	Activation contrôlée altérée vs. Activation automatique préservée dans tâche d'attention sélective (Rabbitt, 1965) ; Attention « top-down » préservée vs. Attention « Bottom-up » altérée (pour revue, Kramer & Madden, 2008).
1965 1996	Biren Salthouse	Ralentissement cognitif généralisé vs. Spécifique	Les sujets âgés sont plus fortement pénalisés que les sujets jeunes lorsque le temps accordé à une tâche est réduit (Salthouse, 1980 ; pour une revue, Cerella, 1990 ; Salthouse, 1996a ; 1996b) ou encore lorsque l'information à traiter est riche (Salthouse, 1985 ; Lindenberger et al., 1993 ; Salthouse, 1996a ; 1996b).
1971	Cattell	Déficit compétences de l'Intelligence fluide	Intelligence fluide altérée vs. Intelligence cristallisée préservée : les habilités cristallisées (surtout verbales) démontrent une modeste amélioration jusqu'à 50 ou 60 ans alors que les performances d'intelligence fluide déclinent progressivement à partir de 20 ans (Horn, 1982).
1981	Welford	Diminution du rapport Signal/bruit	La dégradation du rapport signal/bruit induit une augmentation de la durée des traitements simulés, particulièrement pénalisant pour les tâches complexes ou coûteuses en ressource (Welford, 1981) Implémentation de type Réseau de Neurone Artificiel (Li et al., 1999, 2005) : la neuromodulation dopaminergique est détériorée entraînant du bruit neuronal et une perte de distinctivité corticale dans les activations simulées du système âgé (appariement fort entre les sorties simulées et les données empiriques, et notamment concernant la mémoire).
1983	Craik	Déficit de l'auto-initiation / hypothèse environnementale	Processus auto-initiés altérés vs. processus environnementaux préservés : Les performances des sujets âgés sont améliorées lorsque les stratégies à utiliser pour réaliser la tâche sont précisées (ie. lorsque les consignes orientent et facilitent le traitement à effectuer) ou encore que des supports environnementaux sont fournis au sujet (Craik, 1983 ; pour revue, Craik & Jennings, 1992).

1986	Baddeley	Déficit mémoire de travail	Mémoire de travail altérée vs. systèmes sous-ordonnés préservés (eg., Tâche alpha-span, Belleville et al., 1998; 2003; Cohen, 1988 ; Craik et al., 1990 ; Baddeley, 1999).
1988-97	Hasher & Zacks	Déficit d'Inhibition	Inhibition active altérée vs. Inhibition passive préservée : les personnes âgées ont plus de difficultés à ignorer des informations distrayantes (Hasher & Zacks, 1988); précisément, les processus inhibiteurs passifs/automatiques (habituation à la présentation répétée d'un distracteur) sont relativement bien préservés contrairement aux processus inhibiteurs actifs/contrôlés (éviter d'un nouveau distracteur) qui sont affectés (eg., Hasher et al., 1991 ; Zacks & Hasher L., 1997).
Modèles déficitaires structuraux			
1991	Salthouse & Babcock	Déficit cognitif multiple	Salthouse et Babcock (1991) sont les tous premiers à proposer un modèle structural prédisant les performances de mémoire de travail. Leur étude réalisée 460 sujets âgés de 18 à 87 ans montre que les relations entre l'âge et les performances de mémoire de travail sont en partie directes et en partie indirecte (forte médiation par la vitesse de traitement, mais aussi d'autres facteurs comme les capacités de coordination, etc.). Dans la même veine, Park et al. (1996) montreront que les performances de mémoire (rappel libre, paires associées) sont prédites par plusieurs relations qu'entretient le facteur « âge » avec surtout la vitesse de traitement mais aussi la mémoire de travail, l'inhibition. Par la suite, Salthouse (1998) dissocie alors les " <i>processus cognitif</i> " et " <i>produit cognitif</i> " où les "processus" sont définis par l'efficacité et l'efficacité des opérations cognitives (vitesse de traitement et ressources cognitives) et les "produits" sont le résultat de ces opérations qui ont été accumulés durant toute la vie, sous forme de connaissances au sens large (procédurales et déclaratives).
1991	Kausler	Modèle développemental de différenciation	Kausler propose de différencier trois stades ontogénétiques : i) l'enfance ou période d'indifférenciation cognitive correspondant à une compétence cognitive unique et générale; ii) l'âge adulte ou période de différenciation correspondant au stade de compétences cognitives multiples, spécifiques et hiérarchisées; et iii) l'âge de la vieillesse ou période de différenciation où s'opère une cristallisation des compétences amenant à un retour à une compétence unique et générale.
1994	Lindenberger & Baltes	Déficit systémique	Les mesures de fonctionnement sensoriel (auditif et visuel) partagent pratiquement 90% de la variance liée à l'âge dans une grande variété de tests cognitifs mesurant la vitesse de traitement, le raisonnement, le vocabulaire, la fluence verbale, la mémoire (Lindenberger & Baltes, 1994 ; Baltes & Lindenberger, 1997). Jastrzebski & Charness (2007) observent des coefficients différents de ralentissement pour la sphère cognitive (1.7), perceptuelle (1.8) et motrice (2.1).
Modèle d'optimisation cognitive			
1995-2002	Stern et al.,	Réserve cognitive	Une activité socio-cognitive constitue une réserve cognitivo-protectrice repoussant les effets du vieillissement mais son épuisement précipiterait les effets du vieillissement (Stern et al., 1995). Le niveau d'éducation, de stimulation cognitive (opérationnalisée en termes d'activités professionnelles, de loisirs ou encore d'expertise) constitueraient des neuro-protecteurs. (Schooler & al., 1999 ; Hulstch, Hertzog, Small & Dixon, 1999 ; pour revue Christensen, et al., 2008). L'effet bénéfique de la stimulation cognitive soutenue serait en partie dépendant de l'effet du niveau d'étude (Kliegel, Zimprich & Rott, 2004).
1995	Albert et al.	Réserve systémique	Albert et al. (1995) montrent que si le niveau scolaire est le meilleur prédicteur du déclin cognitif, d'autres prédicteurs sont significatifs (fonctionnement cardio-vasculaire, activité physique). Des études précédentes avaient déjà montrée le rôle protecteur des activités physiques (e.g., aérobic) (Smith et al., 1994; Van Boxtel et al., 1996).

1992-2005	Bäckman & Dixon	Support environnemental	<p>Le Modèle environnemental de compensation s'appuie en partie sur l'hypothèse environnementale de Craik (1983) et elle met avant que toute compensation trouve son origine dans un déséquilibre entre les demandes de la tâche et les compétences/efficience cognitives de l'individu. Trois principes sont alors énoncés :</p> <p>1) <i>La sévérité du déficit cognitif</i>: un faible déficit n'handicape pas suffisamment le sujet pour qu'il s'engage dans un processus de compensation; et un fort déficit sollicite des compétences non disponibles au sujet ; ce facteur expliquerait pourquoi les sujets âgés présentent plus de comportements compensatoires que les sujets jeunes ou que les patients Alzheimer;</p> <p>2) <i>Le niveau de conscience</i> : toute compensation solliciterait des opérations cognitives délibérées et conscientes même si, avec la pratique, le comportement compensatoire peut s'automatiser pour conférer au sujet une plus grande efficacité cognitive. L'automatisation du comportement compensatoire est remise en cause lorsque le déficit cognitif s'aggrave graduellement. Pour un déficit graduel, comme le vieillissement cognitif, le sujet peut s'adapter soit en produisant un nouveau comportement compensatoire (plus adapté aux nouveaux déficits), soit en surinvestissant le comportement compensatoire déjà acquis. Dans les deux cas, cela suppose un recours à des opérations exclusivement délibérées et coûteuses. Les glissements du contrôlé à l'automatique seraient donc compromis au cours du vieillissement.</p> <p>3) <i>Le niveau de support environnemental</i> de la tâche conditionne l'initiation d'une compensation. La notion de support environnemental renvoie à la distinction entre opérations auto-initiées (i.e., dirigées par le sujet) et opérations environnementales (i.e., dirigées par la tâche) (Craik, 1983). Par exemple, pour les épreuves de mémoire, un rappel libre est considéré comme supporté par des processus auto-initiés alors qu'une tâche de reconnaissance est essentiellement supportée par des processus environnementaux. Selon un principe d'économie cognitive, plus les opérations cognitives sont dirigées par la tâche (eg. Reconnaissance) ou par le sujet, (eg., Rappel libre), plus la probabilité d'une compensation diminue. Par contre, lorsque les opérations sont dirigées simultanément par la tâche et par le sujet, la probabilité d'une compensation augmente (Hultsch & Pentz, 1980; Bäckman, 1985; Bäckman & Dixon, 1992). Ainsi, pour les épreuves de mémoire, une compensation s'observerait sur les tâches de rappel indicé et non sur les tâches de rappel ou de reconnaissance.</p> <p>A partir de ces 3 principes, deux principales formes de compensation sont définies chez le sujet âgé :</p> <p>1) les stratégies quantitatives de surinvestissement, qui consistent à surinvestir, en termes d'effort ou de temps, les capacités résiduelles de la fonction déficitaire; les paradigmes expérimentaux empêchant le sujet âgé de mobiliser toutes ses ressources (e.g., double tâche) perturberait la mise en jeu de ce type de stratégie et produirait ainsi un fort déficit (Meyers, 1985; Bäckman & Dixon, 1992; Dixon & Bäckman, 1995).</p> <p>2) les stratégies qualitatives de substitution utilisant des fonctions latentes de substitution lors d'une atteinte d'une fonction de haut niveau. La substitution est le mécanisme de compensation par excellence, c'est-à-dire l'utilisation d'une ou plusieurs compétences afin de contrebalancer un processus déficient. C'est en quelque sorte une activation d'une fonction maintenue inhibée chez le sujet non-déficient, et cette recomposition demeure fonctionnellement moins efficiente.</p>
1998	Salthouse	Plasticité cognitive limitée	<p>Modèle « Remédiation-compilation » : La <i>remédiation</i> regroupe les stratégies de surinvestissement en temps et en énergie de la fonction altérée. (Salthouse, 1984, 1998). La <i>compilation</i> renvoie aux compensations généralisables à de nombreuses tâches cognitives. Elle a la propriété d'être transférable d'un domaine cognitif à l'autre. Dans la séquence d'opérations cognitives d'une tâche, la compilation consiste à réduire la contribution des composants déficitaires et à augmenter l'efficience d'un même composant préservé. Le plus souvent, la</p>

			compilation repose sur le niveau socio-culturel du sujet âgé (dont la contribution est requise dans de nombreuses activités cognitives) (Salthouse, 1987; 1995). Salthouse (1998) a réalisé une méta-analyse des résultats de deux études (Schaie, 1996; Woodcock-Johnson, 1989-1990) utilisant une batterie de tests cognitifs similaires pour évaluer la vitesse de traitement, le niveau de vocabulaire, les capacités d'apprentissage, et de raisonnement. Les résultats de Woodcock-Johnson révèlent un déclin important à toutes les épreuves à partir de 50 ans alors que ceux de Schaie indiquent que les performances aux tests de vocabulaire sont stables avec l'âge et que le déclin aux autres épreuves apparaît au-delà de 60 ans. En faisant covarier les performances aux tests avec le niveau d'éducation, Salthouse montre que cette inconsistance des résultats s'explique par la différence du niveau d'éducation des sujets évalués dans les deux études.
2002	Ball et al.	Capacité réduite d'entraînement cognitif	Effet remédiateur modeste des interventions d'entraînement sur la vitesse de traitement (Ball et al., 2002), ou encore sur l'attention ou la mémoire de travail (eg. Behrer et al. 2005).
1987-2006	Baltes	Théorie bio-culturelle : Processus biologiques (déclin cognitifs/dédifférenciation) vs. Processus culturels (connaissances préservées / réserve cognitive). Modèle SOC (Selection, Optimization, Compensation) (Riediger, Li & Lindenberger, 2006 ; Baltes, Freund et al., 2005)	

Tableau 1 : Récapitulatif des hypothèses et fait marquants du vieillissement cognitif (d'après Sauzéon, 2010)

I.2.c.2. Données en provenance des neurosciences

Les *neurosciences du vieillissement* avaient déjà, via les études post-mortem, établi les effets lésionnels de la sénescence (eg., perte neuronale ; dégénérescence neurofibrillaire, raréfaction dendritique ; diminution de la neuroplasticité, etc., pour une revue : Hawn J. & Delaère P., 1991 ; Boller F. et al., 1996), mais l'avancée remarquable de ce champ d'investigation est certainement la formulation de l'*hypothèse exécutivo-frontale* (West, 1996 ; Braver & West, 2008) basée sur les études comportementales et neuro-fonctionnelles. Ces dernières ont mis en évidence les relations neuro-fonctionnelles concernant l'effet du vieillissement : les lésions de la substance blanche (Fig. 8), celles de la substance grise (Tableau 2) ou encore les dysfonctionnements catécholaminergiques (dopamine surtout) (Arnsten, 1998) sont prépondérants dans le cortex frontal et pré-frontal et sont corrélées au déclin cognitif avec l'âge (pour revue, Li, Lindenberger, et Bäckman, 2010). D'autres lésions et dysfonctionnements neuro-chimiques de la sénescence sont observées au niveau du lobe temporal médian (incluant l'hippocampe) et des noyaux gris centraux (noyau caudé, putamen et substance noire) dont le rôle dans les fonctions de mémoire et d'apprentissage n'est plus à démontrer (eg., deGroot et al., 2000 ; Raz, 2000 ; Raz et al., 2005).

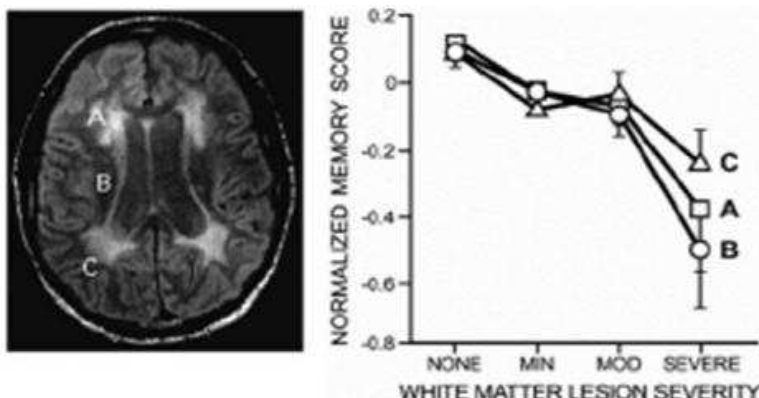


Figure 8 : Lésions de la substance blanche (SB) corrélée au déclin mnésique de la personne âgée.

A gauche, un exemple typique d'hyper-intensités de la SB acquises par IRM en T2 chez un sujet âgé: coupe axiale délivrant des hyper-intensités en régions antérieures (A), latérales (B), et postérieures (C).

A droite, déclin mnésique en fonction de la sévérité des lésions de la SB sur l'axe postéro-antérieur (après correction des effets de l'âge, du sexe et du niveau d'éducation sur un échantillon de 1077

adultes âgés) (Selon Groot et al., 2000).

Frontal	-0.47
Temporal	-0.27
Parietal	-0.29
Caudate	-0.47
Putamen	-0.44
Globus Pallidus	-0.14
Hippocampus	-0.31
Parahippocampal Gyrus	-0.25
Amygdala	-0.26



Tableau 2 : Lésions de la substance grise (SG) liées à l'âge prépondérantes sur le cortex frontal, les noyaux gris centraux et l'hippocampe (selon la méta-analyse de Raz, 2000)

Ces données neuro-fonctionnelles ont alors donné lieu à deux heuristiques majeures guidant l'étude du vieillissement neuro-cognitif (Fig. 9): 1) l'heuristique d'un dysfonctionnement général du circuit fronto-striatal impactant les fonctions exécutives et 2) celle d'un dysfonctionnement spécifique médio-temporal impactant les fonctions mnésiques (pour revue, Hedden and Gabrieli, 2004 ; Buckner, 2004 ; Ballesteros, Nilsson & Lemaire, 2009).

Figure 9: Schématisation des deux facteurs indépendants (Frontal-Striatal et Medio-Temporal) influençant séparément ou de manière combinée le déclin cognitif associé au vieillissement en termes de dysexécutivité et de déclin mnésique (d'après Buckner, 2004).

Le facteur fronto-striatal est de progression lente mais peut aboutir à la démence sénile (un facteur de risque majeur serait l'hypertension).

Le facteur médio-temporal est de progression rapide et peut aboutir à une démence de type Alzheimer, notamment en présence de facteurs génétiques.

		
Earliest Target:	Frontal-Striatal	Medial Temporal and Associated Cortex
Cognitive Domain:	Executive Function Affecting Memory	Memory
Progression:	Slow	Fast
Outcome:	Mild Cognitive Decline to Dementia	Dementia (Alzheimer's Disease)
Risk Factors:	Hypertension	Genetics (APOE)

L'Hypothèse exécutivo-frontale : Posée actuellement comme centrale dans l'étude du vieillissement neuro-cognitif, l'hypothèse exécutivo-frontale considère que les changements observés chez la personne âgée sont le résultat d'un déclin sélectif du fonctionnement de certaines régions cérébrales et en particulier des régions frontale et préfrontale. Cette hypothèse a été élaborée à partir d'une théorie sur les origines de la maladie d'Alzheimer (pour revue, Greenwood, 2000) et constitue la base de l'hypothèse frontale où l'involution liée à l'âge [i.e. loi de Ribot T., 1881] a lieu initialement dans les régions frontales et préfrontales, conduisant au déclin du contrôle exécutif générateur du déclin cognitif de la personne âgée (Albert et Kaplan, 1980 ; Dempster, 1992 ; West, 1996 ; Raz, 2000). Un ensemble d'arguments conforte cette hypothèse [pour revue, West, 1996 ; Braver & West, 2008] dont (1) l'altération chez les sujets âgés des performances à des tests évaluant les fonctions exécutives, (2) l'altération du centre exécutif de la mémoire de travail, et (3) la diminution de l'activité métabolique des régions frontales mise en évidence par la neuro-imagerie.

Les Compensations neuro-cognitives: En complément de cette approche neuro-déficitaire du vieillissement, des travaux se sont intéressés aux phénomènes de compensations neuro-cognitives spontanées (observées chez les âgés dont les performances sont équivalentes à celles des jeunes et qui sont qualifiés de « high performers ») ou provoquées (observées lorsque des conditions expérimentales permettent aux sujets âgés d'atteindre un niveau de performance équivalent à celui des jeunes alors qu'ils étaient déficitaires en situation « contrôle ») (voir la méta-analyse de Spreng Wojtowicz, Cheryl, & Grady, 2010, pourtant sur 80 études). En 2005, une opérationnalisation claire

des différences liées à l'âge sur les patterns d'activation neuro-fonctionnelle est fournie par Reuter-Lorent et Listig (Tableau 3).

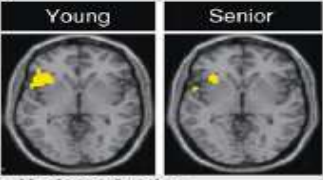
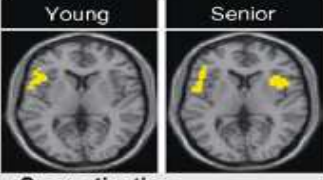
Age differences in activation: impairment or compensation?				
Age-specific pattern		Interpretation	Hypothesized mechanisms	Candidate "diagnostic" criteria
 <p>Young Senior</p> <p>Underactivation</p>		Impairment	Circuitry dysfunction Region-specific atrophy Poor strategy use	Linked to poor performance Correlates with structure Might be reversed with instructions
 <p>Young Senior</p> <p>Overactivation</p>		Compensation	Strategic or neural adjustments to local processing inefficiency Strategic or neural adjustments to processing inefficiency elsewhere in the brain	Linked to good performance Overactivation correlates with regions of underactivation elsewhere in the brain Deactivating TMS impairs performance
		Impairment	Disinhibited or nonselective recruitment Strategic or neural processing inefficiency Selectivity breakdown or dedifferentiation Nonfunctional activity	Linked to poor performance Deactivating TMS improves or has no effect on performance

Tableau 3: Opérationnalisation des patterns d'activation neuro-fonctionnelle en termes d'hypo-/hyper-activation et de niveau de performances atteint (d'après Reuter-Lorent & Listig, 2005)

Les hypo-activations (locales et/ou diffuses) chez les âgés associées à une moindre performance cognitive révèlent un dysfonctionnement de la ou les régions concernées ; ces dernières peuvent être remédiées par de « bonnes » conditions/instructions. On parle alors de *compensation provoquée* comme dans l'étude de Logan et al. (2004) où des instructions d'encodage sémantique permettent aux âgés, d'activer le cortex préfrontal gauche (CPF), mimant ainsi le pattern d'activation des jeunes et leur niveau de performance mnésique alors que, sans ces instructions, des hypo-activations du CPF et des performances altérées s'observent chez les âgés.

- 3) Les hyper-activations (locales et/ou diffuses) chez les âgés i) associées à une moindre performance cognitive, indiquent un dysfonctionnement de la ou les régions concernées ; ii) associées à un maintien de la performance, elles révèlent un mécanisme de *compensation cognitive spontanée*. Une illustration en est fournie par l'effet bien connu, appelé *HAROLD effect (Hemispheric Asymmetry Reduction in older adult)*, où un bon niveau de performance mnésique chez les âgés s'accompagne d'une activation bilatérale du CPF alors qu'elle est unilatérale chez les jeunes (pour revue, Cabeza, 2004, voir Tableau 4 pour illustration). En d'autres termes, là où une tâche implique une activation locale et unilatérale dans un hémisphère cérébral chez les jeunes, pour la même tâche et à même niveau de performances, les âgés recrutent de manière supplémentaire la région homologue de l'autre hémisphère. Ce résultat suggère d'une part, un phénomène de dédifférenciation neuro-fonctionnelle (perte de la spécialisation neuro-fonctionnelle avec l'âge), et d'autre part, d'une augmentation avec l'âge de la charge métabolique pour maintenir un bon niveau de performance (pouvant expliquer la sensibilité des âgés à la complexité de la tâche).

Fonctions cognitives évaluées Méthode d'imagerie : nature de la tâche	jeunes		âgés	
	Frontal gauche	Frontal droit	Frontal gauche	Frontal droit
Récupération en mémoire épisodique				
PET : rappel indicé (Cabeza et al., 1997a)	-	++	+	+
PET : rappel indicé (Bäckman et al., 1997)	-	+	+	+
PET : reconnaissance de mots (Madden et al., 1999)	-	+	++	++
PET : reconnaissance de visages (Grady et al., 2002)	-	++	+	+
Encodage et récupération sémantique				
IRMf : apprentissage incident (Stebbins et al., 2002)	++	+	+	+
IRMf : apprentissage intentionnel (Logan et al., 2002)	++	+	+	+
IRMf : apprentissage incident (Logan et al., 2002)	++	+	++	++
Mémoire de travail				
PET : N-back (Dixit et al., 2000)	+	+++	++	++
Perception				
PET : appariement de visage (Grady et al., 1994, exp.2)	-	+	++	++
PET : appariement de visage (Grady et al., 2000)	+	+++	++	++
Contrôle inhibiteur				
IRMf : go/no go (Nielson et al., 2002)	-	+	+	+

Tableau 4: Récapitulatif de l'activation de la région frontale/préfrontale chez les sujets jeunes et âgés dans diverses tâches cognitives. Les signes (+) indiquent l'activation de la région gauche ou droite et les signes (-) indiquent une absence d'activation. Le nombre de signes (+) représente le degré d'activation selon la tâche considérée. (d'après Cabeza, 2004).

La résultante de ces travaux, portant sur les déclin puis sur les compensations cognitives, est la formulation de théories intégrées du vieillissement neurocognitif, avec, par exemple, la théorie du déficit sensoriel qui propose plusieurs hypothèses neuro-systémiques relatives aux relations entre le déclin sensoriel et le déclin cognitif (Dennis & Cabeza, 2008) (Fig. 10).

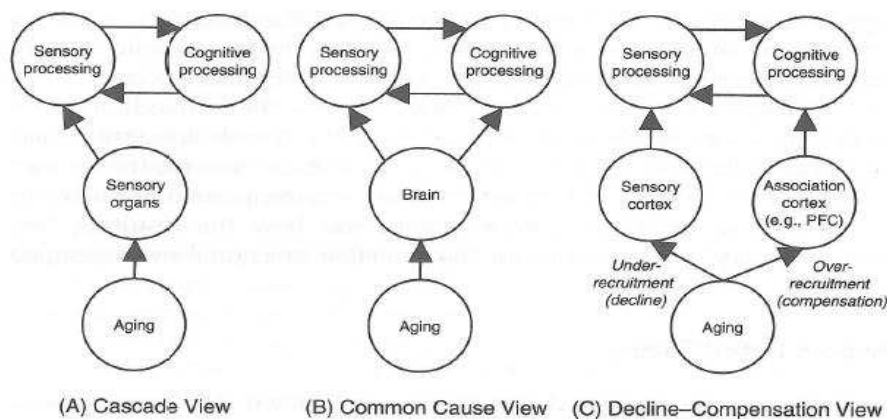


Figure 10 : Théorie neurocognitive du déficit sensoriel et cognitif selon 3 hypothèses (Dennis & Cabeza, 2008).

(A) Cascade : le vieillissement sensoriel périphérique affecte le traitement sensoriel central qui en cascade impacte le cognitif.

(B) Cause commune : le vieillissement cérébral affecte le traitement sensoriel et cognitif.

(C) « Déclin perceptif - compensation cognitive » : le déclin du traitement sensoriel central est compensé par la réserve cognitive (e.g., sur-activation du CPF).

I.2.c.3. Approches appliquées ou dites « facteurs humains »

Jusqu'en dans les années 90, les *approches appliquées ou dites « facteurs humains »* sont peu nombreuses (Fig. 11a et 11b) et, ne constituaient pas un débouché privilégié des recherches sur le vieillissement. Néanmoins, leur rôle est incontestable en termes de compréhension des effets de l'âge sur les activités humaines, de prise de conscience des incidences sociétales qui en découlent dans le contexte du vieillissement démographique, et du besoin de mesures environnementales d'optimisation des activités chez les seniors (e.g., la conduite automobile, Tableau 5).

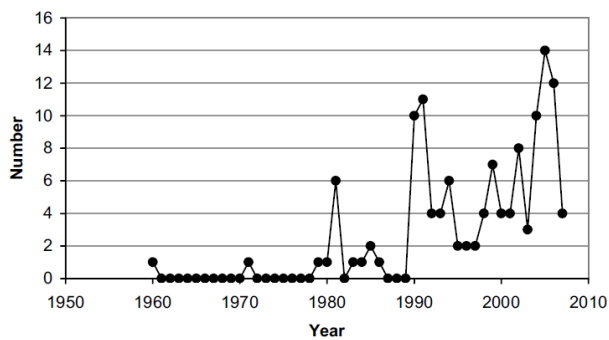


Figure 11a: Nombre d'articles publiés dans Human Factors concernant l'âge ou le vieillissement depuis 2007. (d'après Charness, 2008a).

Figure 11b: « Top 10 » des publications (en termes de nombre de citations depuis 2007, et nombre moyen de citations/an) dans « Human Factors » d'après Charness, 2008a).

Publication	Citations Through 2007	Citations/Year
Ball, K., & Owsley, C. (1991). Identifying correlates of accident involvement for the older driver. <i>Human Factors</i> , 33, 583–595.	93	5.17
Summala, H., & Mikkola, T. (1994). Fatal accidents among car and truck drivers: Effects of fatigue, age, and alcohol-consumption. <i>Human Factors</i> , 36, 315–326.	70	4.67
Welford, A. T. (1981). Signal, noise, performance, and age. <i>Human Factors</i> , 23, 97–109.	65	2.32
Shinar, D., & Schieber, F. (1991). Visual requirements for safety and mobility of older drivers. <i>Human Factors</i> , 33, 507–519.	55	3.06
Parasuraman, R., & Nestor, P. G. (1991). Attention and driving skills in aging and Alzheimers-disease. <i>Human Factors</i> , 33, 539–557.	50	2.78
Jette, A. M., & Branch, L. G. (1992). A 10-year follow-up of driving patterns among the community-dwelling elderly. <i>Human Factors</i> , 34, 25–31.	44	2.59
Brouwer, W. H., Waterink, W., Vanwolffelaar, P. C., & Rothengatten, T. (1991). Divided attention in experienced young and older drivers: Lane tracking and visual analysis in a dynamic driving simulator. <i>Human Factors</i> , 33, 573–582.	42	2.33
Waller, P. F. (1991). The older driver. <i>Human Factors</i> , 33, 499–505.	41	2.28
Stelmach, G. E., & Nahom, A. (1992). Cognitive-motor abilities of the elderly driver. <i>Human Factors</i> , 34, 53–65.	38	2.24
Salthouse, T. A. (1990). Influence of experience on age-differences in cognitive-functioning. <i>Human Factors</i> , 32, 551–569.	38	2.11

Le premier ouvrage de référence, « Human factors and the older adults » (Fisk et Rogers, 1997) identifie trois grands secteurs appliqués : 1/ les activités professionnelles des « seniors » (pour revue, Marquié et al., 1998), 2/ les activités extra-professionnelles avec la navigation (ambulatoire et automobile), les activités de loisir, et les tâches domestiques (gérer ses comptes, adhérer à un traitement médicamenteux, préparer un repas, faire ses courses, etc.), et 3/ l'utilisation des technologies (téléphonie, micro-informatique, etc.) ou plus largement les interface Homme-Machine.

Appréhender les effets du vieillissement sur les activités sollicite la maîtrise des méthodes d'ergonomie cognitive de décomposition de tâche : toute activité est multi-déterminée, c'est-à-dire est une orchestration de fonctions perceptives, motrices et cognitives.

Dès les premières études, il est apparu une discordance des résultats avec ceux issus des tâches de laboratoire. Les méta-analyses quantifiant l'impact global de l'âge révèlent que l'âge est un prédicteur « modéré » des performances sur les tâches de laboratoire ($r > .3$; Cohen et Cohen, 1975 ; Verhaeghen et Salthouse, 1997) alors qu'il est un fort prédicteur de performance (négatif ou positif) sur les tâches de vie réelle telles que la conduite automobile, l'utilisation de produit (eg., les technologies) ou les tâches basées sur l'expérience (activité de loisir, expertise, etc.). Ces effets majorés ou minorés de l'âge sur les activités de vie réelle mettent à jour une sous-estimation ou une sur-estimation du réel impact (fonctionnel) du vieillissement neurocognitif.

Notons qu'à la base de cette mise à jour, l'ancrage des travaux appliqués dans les théories fondamentales du vieillissement a été essentiel. D'abord, les hypothèses déficitaires mono-causales ont été investies : le ralentissement cognitif ou la réduction des ressources cognitives sur la performance humaine est recherché en termes de charge de travail, de conscience de la situation ou encore de rendement d'activité (vitesse et précision de réponse) (pour revue, Fisk et al., 2004). Ensuite, les hypothèses multiples sont explorées et retenues comme les plus pertinentes. Par exemple, Owsley et al. (1991) ont développé le test UFOV (Useful Field Of View) mesurant la capacité à diviser son attention pour la détection simultanée de cibles en vision fovéale et de cibles en vision périphérique. Cette mesure du champ visuel utile prédit rétrospectivement et prospectivement la probabilité à être en situation accidentelle, et est reconnue comme la mesure la

plus fiable de l'aptitude à conduire une voiture¹. Des études en simulateurs ont complété ce résultat en montrant que la conduite ralentie et la plus forte incidence d'erreurs dans la gestion des intersections chez les âgés étaient reliés à l'UFOV mais aussi aux mesures de vitesse de traitement, et de gravité des troubles visuo-spatiaux (Liu et al., 1999 ; Lee & Lee, 2003 ; Shechtman et al., 2007). Autre exemple, l'étude de Jastrzembski et Charness (2007) montre que la moindre performance des âgés à utiliser un téléphone mobile résulte du « ralentissement » prépondérant de la fonction motrice (2.1) conjugué à celui des fonctions perceptives et cognitives (respectivement, 1.8 ; 1.7).

Si la démarche de relier troubles multiples et aptitude à une activité illustre un large pan de recherches menées dans le secteur appliqué, d'autres travaux s'adressent aux mécanismes d'adaptation (ajustement et/ou compensation cognitive) que développent spontanément les personnes âgées pour faire face à leur perte d'aptitude (eg. la conduite automobile, Simeos, 2003, tableau 5). Le rôle crucial des expériences / savoirs capitalisés (opérationnalisés en niveaux d'expertise, d'éducation, etc.) mais aussi celui de l'activité (professionnelle ou de loisir) comme facteur de maintien de la performance, voire de neuro-protecteur contre le vieillissement (pour revue Christensen, et al., 2008), est le fait des travaux « facteurs humains ».

Ainsi, le « va-et-vient » entre cadres théoriques et performance humaine a toujours été fécond, et ce malgré les évidentes contraintes liées à l'étude des activités. Aujourd'hui, ces contraintes sont de plus en plus maîtrisées avec l'introduction de modèles computationnels (eg. modélisation de la perte d'apprentissage et de l'augmentation du rôle de l'expérience chez les joueurs d'échec, Mireles & Charness, 2002) ou l'utilisation des technologies de simulation 3D qui offrent, sans dénaturer l'activité, un cadre d'étude plus contrôlé et plus sécurisé (eg., plus grande standardisation du paramétrage des stimuli et des scénarii comparé à des vidéo-enregistrements en observation naturelle).

Plus récemment, comme dans les études fondamentales (eg., Ergis et al., 2008), des auteurs se sont attelés au problème de la mise en place de stratégies d'intervention « ré-adaptative ». De manière exemplaire, Ball et al. (2007) ont montré que le bénéfice d'un entraînement à la perception accélérée (visant à pallier le déclin UFOV), bien que plus modeste chez les âgés comparés au jeunes, est réel et durable en termes de performances de conduite en simulateur.

¹ La probabilité de décès lors d'un accident est 3 fois plus élevée chez l'automobiliste âgé comparé au jeune et le nombre d'accident/km parcouru décrit une courbe en « U » en fonction de l'âge des conducteurs (Evans, 2004).

Tableau 5 : Déclins, difficultés et compensation pour la conduite automobile (d'après Simeos, 2003)

Age-related declines and the corresponding difficulties in performing the driving task					
	Age-related declines	Declines in abilities related to driving	Difficulties in driving	Compensatory behaviours	
Declines in visual sensations	Sensitivity to light	Higher visual sensitivity threshold	Detecting dim lights in a dark environment High sensitivity to glare	Avoid night driving	
	Dark adaptation	Slower rate for dark adaptation	Increasing glare recovery time	Avoid night driving	
	Visual acuity	Static visual acuity Dynamic visual acuity	Reading a road sign at a distance Appreciating speeds and distances of moving objects	Slower driving	
Declines in visual perception	Spatial contrast sensitivity	Contrast sensitivity for high frequency gratings	Seeing unexpected vehicles in the peripheral visual field Reading dim dashboard display panels Seeing through windshields Reading signs at a distance	Avoiding complex traffic conditions Avoid night driving Slower driving Avoid complex traffic conditions	
	Eye movements	Saccadic movements Pursuit movements	Longer time to locate objects Perceiving details of moving objects	Restriction in the maximum extent of gaze without head movement Compensation with head movements	
	Space perception	Perception of relative distances	Perceiving distances between his or her car and the car ahead or the amount of traffic gap for merging with or crossing a traffic stream	Avoid complex traffic conditions (non conclusive studies on direct effects in safe driving)	
	Motion perception	Sensitivity to angular displacement	Perceiving depth motion Detecting the relative speeds of objects	Avoid complex traffic conditions, merging traffic, lane changes, overtaking	
	Colour perception	Colour vision associated with other age-related visual decrements	Discriminating traffic signs and lights	(non conclusive results on direct effects of poor colour perception in safe driving)	
	Visual field	Useful field of vision (UFOV)	Reduced UFOV, particularly when performing a secondary task or having distracting stimuli	Avoid distraction factors while driving (telephone use, passenger's talking, radio manipulation, etc.)	
	Attention	Divided attention	Performing simultaneous tasks	Avoid simultaneous tasks (telephone use, passenger's talking, radio manipulation, etc.)	
	Declines in cognitive abilities	Memory	Selective attention and attention switching	Discrimination of the useful information due to difficulties in inhibiting irrelevant information processing	Concentration on the driving task, sometimes neglecting any displayed information
			Working memory (WM)	Longer time to access information in WM, hesitancy in decision making, both increasing with traffic complexity	Slow driving, hesitant driving and unexpected manoeuvres
		Problem solving	Long-term memory (LTM)	Formation of new long-term memories, recalling driving laws, remembering what to do in specific driving situations, particularly in modern road environments and vehicles	Avoiding driving in complex traffic conditions, rush hours and unknown environments, due to increasing difficulty in driving nowadays
Decision making			Deciding to proceed to an intersection on a yellow light, figuring out how to navigate across town, determining the adequate driving speed, etc.	Avoid complex traffic conditions, rush hours and unknown environments	
Spatial cognition		Mental rotation Cognitive mapping	Slower and less accurate mental rotation of images Spatial representations, remembering and recalling landmarks, creating detailed and organized maps of their neighbourhoods, even well known	Avoid the use of maps, just drive in well known environments	
Perceptual style	Way finding Increasing field dependence	Navigating and finding locations Fixations concentrated within a narrow field of view, leading to difficulties in target detection in complex environments, increasing time for searching the road for driving-related information	Avoid congested traffic, motorways and unknown environments, due to reduced ability to control skidding vehicles, to use information about accelerating and braking of other vehicles and to drive defensively in high speed traffic		
Declines in motor or skills psychomotor skills	Reaction time	Increased choice reaction time	Slower information processing	Slower driving	
	Motor coordination	Less accuracy in movement	Decrease of precision of both discrete and continuous movements	No significant influence in driving performance, unless for novice old drivers	
	Range of motion and reaching distances: Loss of muscle strength, endurance and tone	Reduced range of neck motion	Scanning road environment and performing reversing manoeuvres	Avoid parking manoeuvres, lane changes, merging traffic, overtaking and other high risk driving situations	

Dans le secteur des interfaces Homme-Machine et de ses liens avec la gérontologie environnementale (pour revue, Scheidt et Windley, 2006), les études du vieillissement étaient marginales jusque dans les années 90 et, ont explosé avec l'accès grandissant des technologies dans notre vie courante (téléphonie, micro-informatique, micro-électronique et robotique) (Fig. 13).

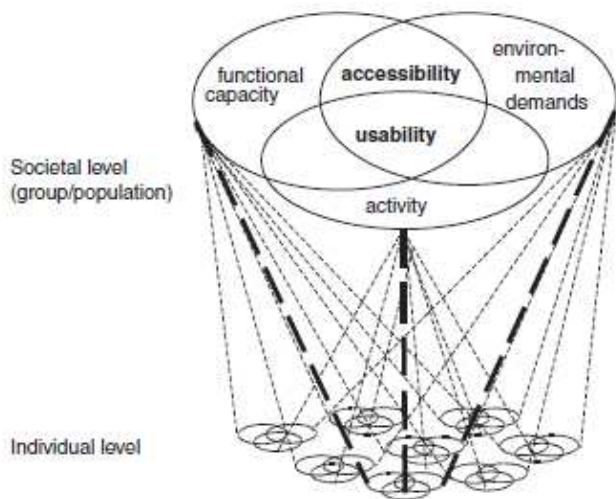


Figure 12 : Modèle de l'activité « Personne-Environnement » au niveau individuel et sociétal (selon Carlsson, 2002).

L'accessibilité environnementale renvoie au niveau d'adéquation entre les capacités fonctionnelles d'un individu et les demandes environnementales. L'utilisabilité renvoie aux perceptions subjectives de l'utilisateur en termes d'efficacité et de satisfaction à utiliser un instrument technologique.

Une très belle étude menée par le groupe CREATE (Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement) a montré clairement que sur une cohorte de plus de 1200 participants âgés de 18 à 91 ans, les performances d'utilisation de l'ordinateur ainsi que du web sont certes prédites par le déclin cognitif lié à l'âge mais aussi par le niveau de technophobie (Czaja et al., 2006) (Fig. 13). Or, le niveau de technophobie est essentiellement déterminé par l'efficacité perçue par l'utilisateur. Ainsi, en introduisant le point de vue de l'utilisateur, cette étude révèle clairement que le fossé générationnel envers les technologies est certes imputable au vieillissement cognitif mais peut aussi être surmonté en augmentant le niveau d'acceptabilité et d'accessibilité pour les âgés (Fig. 12 ; 13).

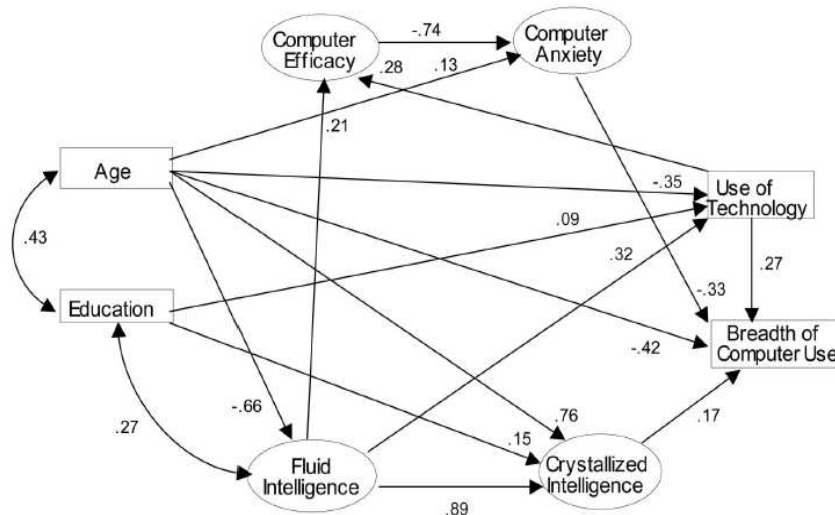


Figure 13 : Modèle de l'étendue d'utilisation d'un ordinateur avec les coefficients de régression standardisés (d'après Czaja, et al., 2006).

Notes. Les « boîtes » sont les variables mesurées et les « ovales » sont les variables latentes. Les valeurs sur les flèches sont interprétables comme des « poids » de régression (% de variance expliquée) entre les prédicteurs et les variables prédites après le contrôle des effets des autres variables.

Cette conclusion est en accord avec les études consacrées aux contraintes utilisateurs âgés ou présentant un handicap, et qui fournissent, aujourd'hui, un retour d'expérience opérationnel (normes ISO-TR 22411 d'ergonomie des interfaces, 2008, pour détails, voir Charness, 2008). Et, le respect de ces normes permet de concevoir des interfaces plus adaptées, c'est-à-dire accessible et considérée par les utilisateurs comme utile (contentement et intérêt perçu) et utilisable (sentiment d'efficacité à l'utilisation) et, donc, moins anxiogène pour la personne (Morrow & Rogers, 2008).

Avec une meilleure prise en compte des besoins-utilisateur dans la conception des interfaces s'observe une généralisation des usages quotidiens des technologies notamment palpables par le succès que remportent actuellement les géronto-technologies adaptatives (pour revues, Pollack, 2005 ; Scialfa & Fernie, 2006). Ce nouvel engouement témoigne également d'un changement attitudinal envers les technologies : les personnes âgées, et encore plus celles de demain, sont de plus en plus en mesure de les accepter (Hawthorn, 2000 ; Zajicek, 2003 ; Sayers, 2004, Lindenberger et al. 2008).

Conclusion

En résumé, sur une courte échelle de temps de 60 ans, d'importants progrès ont été réalisés tant sur le plan de la validité empirique et formelle des théories du vieillissement neurocognitif que sur le plan de leur réalité écologique: les mécanismes neurocognitifs favorisés et défavorisés par l'âge et les activités impactées sont relativement bien renseignés, et les bénéfices réels d'un entraînement cognitif sont avérés (aussi modestes soient-ils).

De ce constat, s'ouvrent les recherches interventionnistes ou palliatives, où les technologies sont au cœur des solutions explorées, avec en première ligne les géronto-technologies (Lindenberger et al., 2008). Sans en réduire l'intérêt, ni en nier la demande croissante des personnes âgées désireuses de prolonger leur autonomie, il reste néanmoins à en démontrer l'efficacité et, surtout leur valeur ajoutée en comparaison des instruments existants et à disposition.

Comme souligné par Charness (2008a), ce nouveau défi scientifique requiert de poursuivre les efforts de compréhension des liens entre activité et vieillissement neurocognitif, et, en particulier, d'opérationnaliser plus clairement les liens entre « étapes de traitement » nécessaires à une activité et perte de fiabilité induite par le vieillissement neurocognitif. Ce nouveau défi laisse présager une large place aux approches mêlant la psychologie, les neurosciences et l'ergonomie cognitive.

Chapitre II : Cognition spatiale : Bases théoriques et Résultats du domaine

Résumé : Le but de cette partie sera de décrire les bases théoriques des différents domaines de la cognition spatiale (classifications et descriptions des fonctions visuo-spatiales, cadres de références, description et définition du concept « wayfinding », relation entre activités sensorimotrices et cognition spatiale). Dans un second temps, il s'agira de décrire les applications de la réalité virtuelle dans les différents domaines d'étude de la cognition spatiale.

Introduction

Les capacités visuo-spatiales (« *Spatial Abilities* », en anglais) sont primordiales pour de nombreuses activités professionnelles comme l'architecture, l'astronomie, la chimie, la biologie, la cartographie, l'ingénierie, la géologie, les mathématiques ..., ainsi que des activités quotidiennes comme la manipulation d'objets, les rangements ou la navigation (Hegarty & Waller, 2005 ; Mohler, 2006).

Elles ont pris différentes définitions selon les approches (Allen, 1999 ; p. 51 - 70). Les approches psychométriques ont reposé sur l'étude des différences individuelles entre les différentes aptitudes, permettant de montrer leurs relations ou leurs différences par des analyses factorielles. Lohman (1993) les a décrites comme « *l'aptitude à générer, retenir, récupérer et transformer une image visuelle bien structurée* ». Elles seraient associées à de nombreuses activités quotidiennes comme déplacer des objets, des meubles, remplir une valise, attraper une balle, ou activités professionnelles, comme la mécanique, le pilotage, la chirurgie, la chimie ou la navigation (Hegarty & Waller, 2005 ; Mohler, 2006). Les différentes approches (psychométriques, développementales et neuropsychologiques) ont abouti à des descriptions et classifications correspondant et se recoupant le plus souvent (Allen, 1999). Allen (1999) en passant en revue ces différentes axes de recherche a distingué trois grandes classes de capacités visuo-spatiales, selon la taille de l'espace et les déplacements ou non entre les objets, le sujet et l'espace. Cette classification d'Allen est similaire à d'autres distinguant différents niveaux de traitement de l'espace (péri-personnel vs extra-personnel ; Previc, 1998) ou capacités Visuospatiales à petite et grande échelle (Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa, & Lovelace, 2006).

Dans les parties suivantes seront définis les différents concepts nécessaires à la compréhension des problématiques rencontrées dans le domaine de la cognition spatiale. Le problème des cadres de référence, les différentes classifications de la cognition spatiale, les définitions du concept wayfinding ainsi que ses classifications des fonctions visuospatiales y seront abordés. Les différents domaines de la cognition spatiale dans les grands espaces seront également décrits comme les niveaux de représentations de l'espace et les différents modèles d'acquisition de ces représentations, le rôle des activités sensorimotrices dans la cognition spatiale à grande échelle, ainsi que la description des différents modèles décrivant l'activité de navigation et les stratégies de navigation (ou « wayfinding ») et finalement les bases neurales de la cognition spatiale dans les grands espaces.

II .1. Représentations spatiales égocentriques vs allocentriques

Un point central de l'étude de la cognition spatiale est la question des cadres de références des représentations de l'espace, que ce soit pour les processus d'encodage, de reconnaissance, de mise à jour spatiale ou de stockage de ces représentations (Burgess, 2006; Byrne, Burgess, & Becker, 2007; Mcnamara, Rump, & Wezner, 2003).

Les représentations spatiales égocentriques désignent celles dont le système de référence est le corps (Easton & Sholl, 1996; Klatzky, 1998; Woodin & Allport, 1998, voir Fig. 14). Ces systèmes de référence seraient représentés en coordonnées polaires, avec le corps comme origine et l'avant

du corps servant de référentiel de direction (Klatzky, 1998). Plusieurs représentations égocentriques seraient représentées dans le système nerveux central, en fonction des récepteurs sensoriels concernés : les systèmes rétino-topique (dont la référence est la rétine), crânio-topique (dont la référence est le crâne), le référentiel « tronc » ou « la main » (pour revue, voir Andersen, 1997 ; Burgess, 2008 ; Committeri, Galati, Paradis, Pizzamiglio, Berthoz & LeBihan, 2003 ; Vallar, Lobel, Galati, Berthoz, Pizzamiglio & Le Bihan, 1999) sont les plus souvent décrits. Des transformations seraient nécessaires entre ces référentiels, notamment du référentiel rétino-topique d'où proviennent les informations visuelles vers les autres référentiels (crânio-topique, tronc...). Ces transformations seraient basées sur l'intégration des informations vestibulaires, visuelles, de la proprioception du cou, et d'information sur la position des yeux (Andersen, 1997 ; Vallar, 1999 ; Byrne et al., 2007).

Les représentations spatiales allocentriques aussi appelées « géocentriques », décrivent les représentations de l'espace basées sur un référentiel extérieur au sujet, centré sur l'environnement (Klatzky, 1998). Cette représentation permettrait de conserver les positions relatives entre les éléments et objets dans un espace et serait indépendante de la position et de l'orientation du sujet (Burgess, 2008; Easton & Sholl, 1995; Klatzky, 1998 ; McNamara, 2003, Fig. 14).

De nombreuses données suggèrent que ces deux systèmes de représentations coexistent et interagissent durant les apprentissages, la navigation et la mise à jour de son orientation (Burgess, 2006; Burgess, 2008; Byrne, Burgess & Becker, 2007; Easton & Sholl, 1995; Klatzky, 1998; Mou, McNamara, Rump & Xiao, 2006; Woodin & Allport, 1998; par exemple).

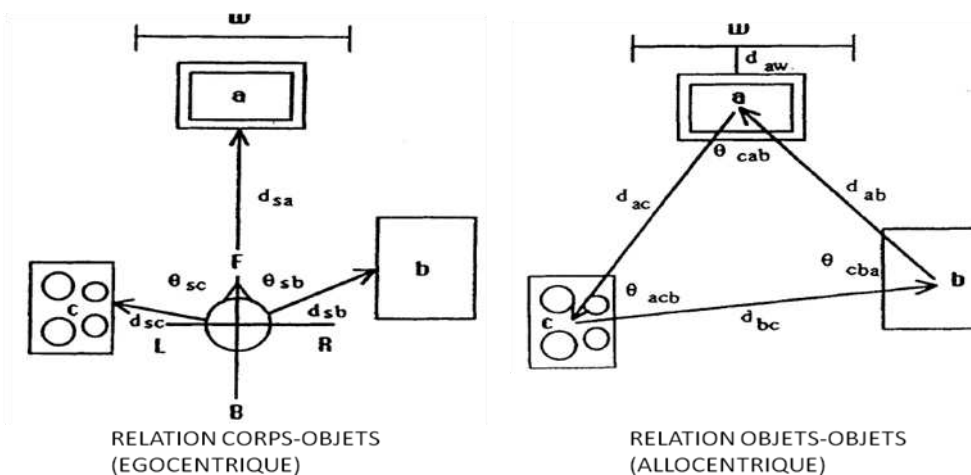


Figure 14 : Description et propriétés des représentations spatiales égocentriques (corps-objet) et allocentriques (objet-objet) (Easton & Sholl, 1995).

II.2. Classifications des capacités visuospatiales

Les capacités spatiales ne représenteraient pas un facteur unique et ont été classées au fil des études en différentes composantes, dont le nombre et la description varient selon les auteurs (Allen, 1999; Hegarty & Waller, 2005; McGee, 1979; Mohler, 2006; Voyer, Voyer & Bryden, 1995; Tableau 6) et les approches (psychométriques, développementales ou neuropsychologiques).

La distinction la plus couramment rapportée dans les analyses factorielles est celle entre les facteurs visualisation spatiale et orientation spatiale (pour revue, voir McGee, 1979 ; Hegarty & Waller, 2004) et celle relative à la distinction entre cognition spatiale à petite échelle vs. grande échelle (Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa & Lovelace, 2006)

II.2.a. Distinction Visualisation vs. Orientation spatiale

La *Visualisation spatiale* a été définie comme l'aptitude à effectuer des transformations spatiales d'objets (rotations et translations), dans lesquelles la position d'un objet change par rapport à un autre ou par rapport au référentiel allocentrique. Le test le plus spécifique à cette aptitude semble être le test de Rotation Mentale de Shepard & Meltzer (1971). Il s'agit de déterminer si deux

figures en trois dimensions, composées de cubes, orientées différemment dans l'espace, sont identiques ou sont miroirs l'une par rapport à l'autre (Voir Fig. 15). Une version plus récente et utilisant les mêmes figures a été développée par Vandenberg, Kuse and Vogler (1978). Ce tests nécessite de tourner mentalement ces figures dans l'espace et de les comparer. Une caractéristique importante de cette aptitude est l'augmentation linéaire du temps de réaction et des erreurs en fonction de l'angle de rotation entre les deux figures (Shepard & Meltzer, 1971).

Etudes	Facteurs identifiés	Tests associés
Michael, Guilford, Fruchter, & Zimmerman, 1957	1- Visualisation spatiale 2- Relations Spatiales and Orientation Spatiale 3- Imagerie kinesthésiques	Paper Folding, Form Board Cube comparison Test, Guilford Zimmerman Spatial Orientation, Card Rotation Hand's test
Mc Gee, 1979	1- Visualisation spatiale 2- Orientation Spatiale	Paper Folding Cube comparison Test, Gulford Zimmerman Spatial Orientation
Lohman, 1988	1- Visualisation spatiale 2- Relations Spatiales 3- Orientation Spatiale	Paper Folding, Form Board, Cube Comparison Test Card Rotation Guilford Zimmerman Spatial Orientation
Carroll, 1993	1- Visualisation spatiale 2- Relations Spatiales 3- Closure Speed 4- Flexibility of closure 5- Perceptual Speed 6- Mémoire visuelle	Paper Folding Test, Form Board, Cube Comparisons, Guilford-Zimmerman Spatial Orientation Card Rotation Snowy Pictures Hidden Figures Identical Pictures Silverman-Eals visual memory

Tableau 6: Diversité des facteurs visuo-spatiaux identifiés, utilisant des approches par analyses factorielles (d'après Hegarty & Waller, 2005).

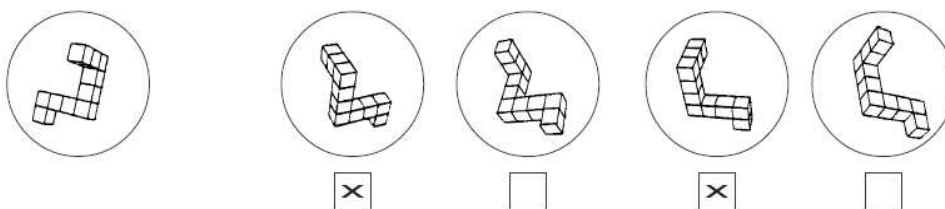


Figure 15 : Figures développées pour le test de rotation mentale. Dans la version de Vandenberg, Kuse et Vogler (1978), il faut déterminer parmi les 4 figures de droite, celles qui sont identiques à la figure se trouvant à gauche.

L'Orientation spatiale a été définie comme l'aptitude à effectuer des transformations spatiales égocentriques par rapport à l'environnement, dans lesquelles les relations entre les référentiels «objets» et «environnement» ne changent pas. Elle peut être également définie comme l'aptitude à s'imaginer un espace selon une perspective différente de celle occupée par le sujet (Hegarty & Waller, 2004 : May, 2004). Le test classiquement utilisé est le test d'orientation spatiale Guilford & Zimmermann (1948). Le but de ce test est de décrire les mouvements d'un bateau entre deux images, en utilisant le paysage et un point de mire comme références (Fig. 16). Ce test d'orientation spatiale n'a pu être dissocié du facteur « *visualisation spatiale* » dans l'analyse de Carroll (1993). Plusieurs explications ont été proposées par Hegarty & Waller (2004), notamment

que les tests utilisés pour évaluer cette aptitude n'étaient pas assez spécifiques ou pouvaient être résolus par des stratégies utilisant les capacités de rotation mentale.

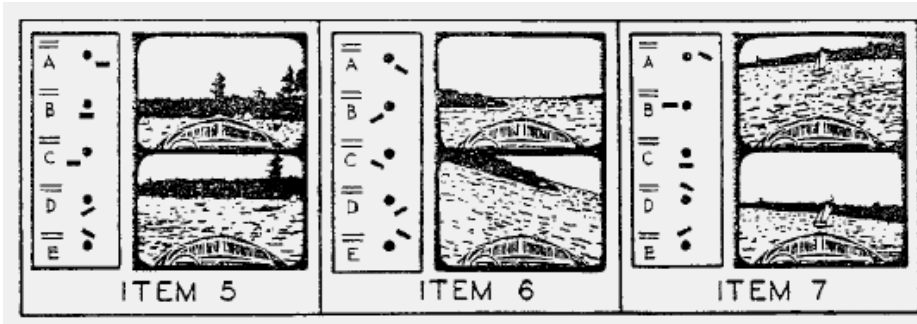


Figure 16 : Test d'orientation spatiale de Guilford & Zimmerman (Guilford & Zimmermann, 1945).

La dissociation entre le facteur orientation spatiale et le facteur visualisation spatiale (représenté par des tests de rotation mentale) est soutenue par de récentes études (Kozhevnikov & Hegarty, 2001; Hegarty & Waller, 2004). Dans ces études, le facteur orientation spatiale a été évalué par un nouveau test de prise de perspective mentale (« *Imaginal Perspective Taking* » en anglais). Dans ce type de test, le but est d'apprendre une carte ou une série d'objet depuis une perspective particulière, puis de décrire cet espace en estimant la direction de ces objets en s'imaginant dans une nouvelle perspective. La prise de perspective mentale est une aptitude complexe nécessitant l'identification de stimuli, récupération de mémoire spatiale, transformation des coordonnées des objets et des positions, planification et exécution de la réponse (May, 2004). Différents pattern de réponses ont été décrits dans la littérature entre des prises de perspectives nécessitant une rotation ou une translation. Les études montrent généralement des temps de réponses plus longs et des erreurs plus importantes pour des rotations imaginées que pour des translations imaginées. Elles montrent également une augmentation des temps de réponses et des erreurs en fonction de l'angle de rotation entre les deux perspectives (pour revue, voir May, 2004) de manière similaire aux tests de rotation mentale. Deux classes d'hypothèses ont été émises pour décrire ces résultats :

L'hypothèse de la transformation mentale, qui serait une extension du mécanisme de rotation mentale de Shepard & Meltzer (1971), propose que la difficulté pour ces tâches de prise de perspective vienne du fait qu'elles requièrent une transformation mentale des coordonnées des objets, lors du changement de perspective imaginé dans l'environnement. Le modèle le plus développé de cette classe d'hypothèse repose sur l'interaction et la superposition entre les systèmes de référence égocentrique et allocentrique (Easton & Sholl, 1995). Le repositionnement imaginé lors de la prise de perspective est un processus analogue à une rotation mentale, où une superposition imaginée du système égocentrique (relation « corps-objet ») s'effectue sur une portion du système allocentrique (relations « objet-objet »). La difficulté et le temps de réponse augmentent en fonction de l'angle de rotation entre les deux perspectives.

La seconde hypothèse expliquant ce pattern de résultat est celle des *interférences*, proposée par May (2004). Elle propose que la difficulté de la prise de perspective vienne de l'interférence entre le codage sensorimoteur correspondant à la perspective occupée réellement par le sujet et le codage cognitif de la perspective imaginée. Deux sources informationnelles (sensorimotrices vs. cognitives) non congruentes seraient donc à l'origine de l'interférence.

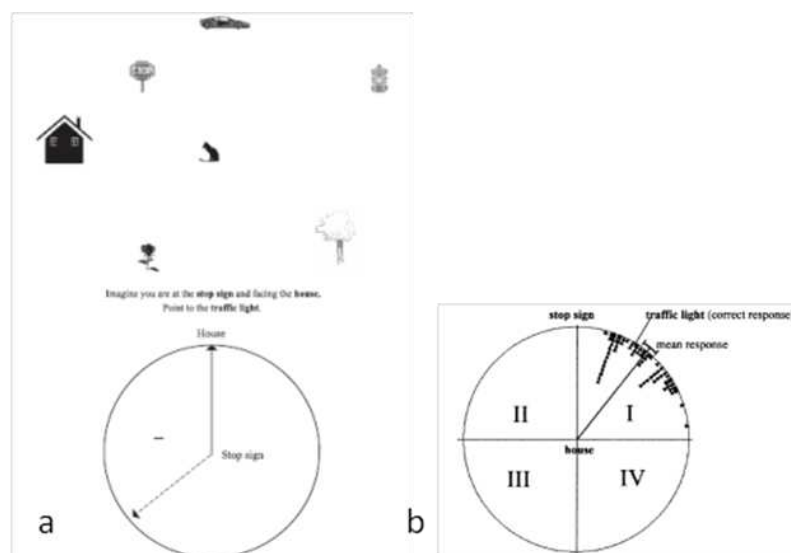


Figure 17 : a - Exemple d'item utilisé pour un test de prise de perspective mentale ; b - Exemple de réponses données pour ce test de prise de perspective mentale (Hegarty & Waller, 2004).

La dissociation entre la manipulation mentale d'objets (visualisation spatiale) et la prise de perspective mentale (orientation spatiale) semble être confirmée par un faisceau de preuves concernant notamment les différences de genre (Voyer, Voyer & Bryden, 1995) ou encore les corrélats neuronaux (Zacks, Vettel & Michelon, 2003). Concernant les études neuro-fonctionnelles, la manipulation mentale d'objets a été associée à une augmentation de l'activité du cortex pariétal droit et une diminution dans le cortex pariétal gauche ; à la différence, la prise de perspective mentale est observée comme associée à une augmentation de l'activité du cortex temporal gauche (Zacks, Vettel & Michelon, 2003).

Investigators (year)	Number of participants	Correlations reported	Range of correlations	Median correlation
Walsh, Krauss, & Regnier (1981)	31	2	.47 to .57	.52
Bryant (1982)	85	2	.26 to .39	.33
Goldin & Thorndyke (1982)	94	18	?? to .3	Not reported
Meld (1985/1986)	61	8	.03 to .24	.09
Pearson & Jalongo (1986)	353	8	.08 to .30	.18
Lorenz (1988) – (Study 1)	56	24	.01 to .34	.09
Lorenz (1988) – (Study 2)	109	15	.00 to .44	.10
Sholl (1988) – (Study 1)	28	4	.07 to .19	.14
Rovine & Weisman (1989)	45	18	.01 to .43	.21
Allen et al. (1996) – (Original sample)	100	42	.02 to .37	.16
Allen et al. (1996) – (Validation sample)	103	42	.00 to .41	.19
Juan-Espinosa et al. (2000)	111	4	.20 to .30	.27
Waller (2000)	151	9	.01 to .34	.20
Kirasic (2001)	240	30	.05 to .39	.22
Hegarty et al. (submitted)	221	12	.11 to .41	.26

Tableau 7 : Résumé des études portant sur les corrélations entre les aptitudes spatiales à petite et à grande échelle (Hegarty & Waller, 2005).

II.2.b. Distinction entre cognition spatiale à petite vs grande échelle

Une autre distinction concerne les *aptitudes spatiales à petite échelle* (généralement de type « papier crayon » permettant la manipulation mentale d'objets : tests de rotation mentale², tests de

²Le test de rotation mentale consiste à déterminer si deux figures en 3 dimensions, tournées différemment dans l'espace, sont identiques ou sont miroirs l'une de l'autre (Shepard & Meltzer, 1971).

Guilford & Zimmermann³,...par exemple) et à *grande échelle* ou *macro-spatiales* (navigation et apprentissage dans de grands espaces ; Allen, 1999 ; Lorenz & Neisser, 1986 ; Montello, 1993 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Hegarty et al., 2006 ; Siegel & White, 1975). Elle repose sur la faible corrélation rapportée entre les tests sur papier (nécessitant la manipulation mentale d'objets ...) et les performances d'apprentissage et de navigation dans des grands espaces et en conditions réelles (voir Tableau 7). En regard de la distinction capacité visuospatiale à petite vs grande échelle (pour revue, Wolbers & Hegarty, 2010), celles à petite échelle seraient associées au contrôle visuo-moteur. Notamment les capacités de rotation mentale participeraient à l'anticipation visuo-motrice nécessaire au contrôle de mouvements de la main (Kosslyn, DiGirolamo, Thompson & Alpert, 1998 ; Wexler, Kosslyn & Berthoz, 1998).

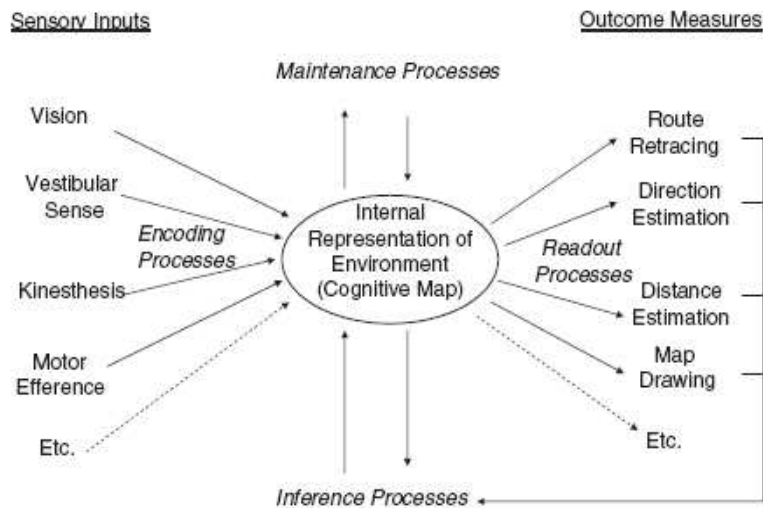


Figure 18 : Représentation schématique des processus nécessaires à l'apprentissage et la navigation dans des grands espaces (Hegarty et al., 2006).

La cognition spatiale à grande échelle concerne les capacités à acquérir des représentations internes d'un espace à échelle environnementale et de naviguer dans celui-ci (Allen, 1999 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Wolbers & Hegarty, 2010). D'après le modèle (Figure 20) proposé par Hegarty et coll. (2006), elles nécessiteraient d'intégrer un ensemble d'informations sensorimotrices (intégration de trajet) et visuelles, permettant de développer une représentation spatiale interne (carte cognitive) (Hegarty et coll., 2006, voir aussi Allen, 1999), permettant de réaliser différentes tâches comme répéter des routes, estimer des directions et des distances, dessiner des cartes ou naviguer. Ce modèle suppose également des processus de maintien d'informations (en mémoire de travail) et d'inférence utilisant ces représentations internes. Les travaux dans le domaine de la cognition spatiale sont très nombreux et ce domaine sera développé dans les parties suivantes.

II.3. Relations entre cognition spatiale à petite et grande échelle

Différents modèles de relation entre les aptitudes spatiales à petite et grande échelle ont été proposés (pour revue voir Hegarty et coll., 2006, Fig. 19) : modèles unitaires (pas de dissociation, tous les processus sont communs entre tests visuospatiaux à petite échelle et la navigation dans les grands espaces ; Gaulin, 1995, Kimura, 2000 ; Jones, Braithwaite, & Healy, 2003), expliquant la différence liée au sexe sur les fonctions visuospatiales à petite échelle par des différences de mobilité au cours de l'évolution), modèle de dissociation (totale ou partielle : Montello, 1993 ; Tversky, Morrison, Franklin, & Bryant, 1999, par exemple) ou encore modèle à médiation (où la relation entre ces aptitudes est expliquée par un autre facteur).

³Le test Guilford & Zimmermann est séparé en deux parties : la partie 5, appelée test d'orientation spatiale, a pour but de décrire le mouvement d'un bateau dans un paysage, par rapport à un point de mire imaginaire. La partie 6, appelée test de visualisation spatiale, a pour but de donner la position finale d'une horloge après des mouvements indiqués par un cadran (Guilford & Zimmermann, 1948).

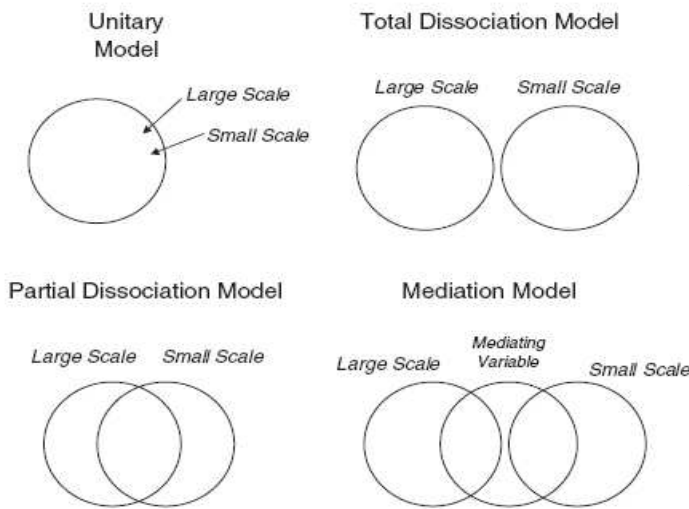


Figure 19: Description des modèles de relations entre les aptitudes à grande et petite échelle (Hegarty et coll., 2006).

Hegarty et al. (2006) ont proposé, à partir d'une analyse factorielle, de vérifier les différents modèles de relation entre les aptitudes à petite et grande échelle. Ils ont étudié les relations entre différentes mesures d'acquisition de connaissances spatiales : des apprentissages en réel ou à partir d'une vidéo, des aptitudes spatiales à petite échelle (« *Mental Rotation* », « *Embedded Figures* », « *Arrow Span* ») et l'auto-estimation par la personne elle-même de son sens de l'orientation (*SBSOD*, Hegarty et al., 2004).

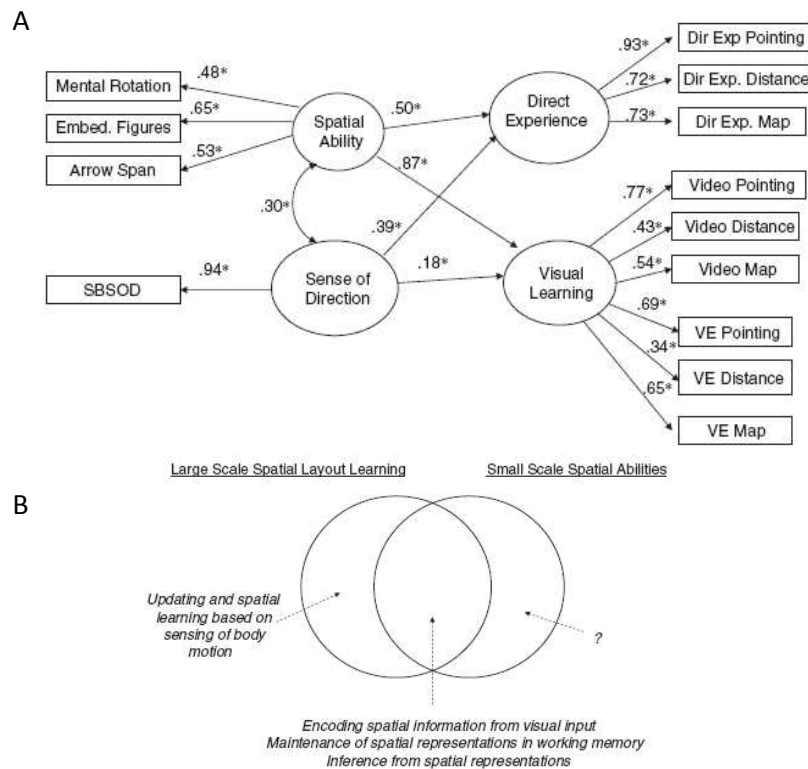


Figure 20 : (A) Résultat de l'analyse structurale de Hegarty et al. (1996), montrant les relations entre apprentissage et en réel et en virtuel d'une part et les capacités visuospatiales et le sens de l'orientation d'autre part. (B) Modèle de dissociation partielle issu de l'analyse structurale.

Comme ils l'avaient supposé, les aptitudes spatiales à petite échelle sont plus prédictives des performances d'apprentissage à partir d'une vidéo ou d'une simulation en RV qu'à partir d'un apprentissage réel. Le sens de l'orientation (mesurant indirectement les capacités de mise à jour spatiale basée sur les informations sensorimotrices), serait plus prédictif des performances d'apprentissage en réel qu'à partir d'une vidéo. Le modèle à dissociation partielle serait, selon eux, le seul compatible avec leur analyse structurale. Les aptitudes à petite et grande échelles partageraient, comme processus en commun, l'encodage d'informations visuelles et leur maintien en mémoire de travail. La cognition spatiale dans des grands espaces aurait, comme processus particulier, l'intégration et l'utilisation d'informations sensorimotrices (appelée *intégration de trajet*) pour la mise à jour spatiale et l'apprentissage topographique (pour revue, voir Chrastil & Warren, 2012).

Le modèle de relation par médiation est celui avancé par Allen, Kirasic, Dobson, Long & Beck (1996). Ils proposent que la mémoire séquentielle d'une part et la prise de perspective mentale d'autre part, fasse la médiation respectivement entre les aptitudes à petite échelle et la mémoire de « route » (appelée « *topologique* » par les auteurs) et le développement de représentations configurationnelles (appelées « *euclidiennes* » par les auteurs)⁴ (Fig. 21).

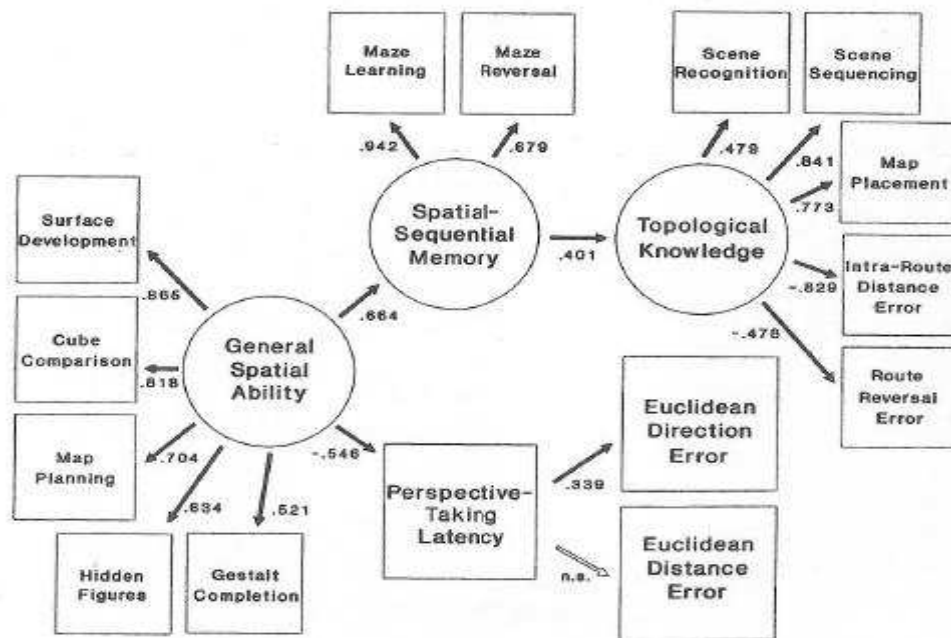


Figure 21 : Modèle à médiation (analyse de pas) proposé par Allen et al. (1996). La relation entre les capacités visuospatiales à petite échelle (« General Spatial Ability ») et l'acquisition des connaissances de type « Route » (« Topological Knowledge ») serait médiée par un facteur « Mémoire spatiale séquentielle ». Celle entre les capacités visuospatiales à petite échelle et l'acquisition des connaissances de type « Survey » (« Euclidean ») serait médiée par la rapidité de prise de perspective mentale (« Perspective Taking Latency »).

Hegarty et al. (2006) ont également voulu vérifier si les effets liés au sexe sur les capacités VS à petite et grande échelle étaient identiques et si une origine commune expliquait les différences liées au sexe sur ces types capacités VS. Ils ont obtenu des différences liées au sexe comparables aux études précédentes sur les capacités visuospatiales à petite échelle, et également des différences pour les capacités visuospatiales à grande échelle, mais moins importantes (surtout lorsqu'il s'agit d'estimer des directions et des distances à partir d'un apprentissage séquentiel). Lorsque l'effet du sexe sur les capacités visuospatiales à petite échelle et le sens de l'orientation étaient partialisés, la relation entre le sexe et les capacités visuospatiales à grande échelle devenait

⁴ Voir en détail la partie ci-dessous sur les niveaux de représentations de l'espace: « Route »: mémoire pour une sequence de positions associées à des décisions ou des actions; « Configurationnel »: Représentation allocentrique, métrique des positions d'un espace donné.

nulle. Ils en ont conclu qu'une cause commune expliquait en partie la différence liée au sexe sur les capacités visuospatiales à petite et grande échelle

II.4. Cognition spatiale à grande échelle

Introduction

La revue de Wolbers & Hegarty (2010) permet d'avoir un aperçu plus détaillé des aptitudes et des processus impliqués dans la navigation et l'apprentissage dans des grands espaces. La navigation dans des grands espaces y est définie comme une activité complexe, nécessitant des aptitudes nombreuses, en particulier celles reliées au caractère dynamique de la navigation, la taille des espaces et l'invisibilité des positions à atteindre: indices spatiaux environnementaux (objets, repères distaux et proximaux...) ou relatives aux mouvements du corps (voir partie sur l'intégration de trajet); mécanismes computationnels spatiaux (perception de l'espace, des mouvements propres, translations entre cadres de références égocentriques et allocentriques, calcul des directions et des distances des buts invisibles, changements de perspectives) et exécutifs (détection des nouveautés, sélection et maintien des buts de navigation, sélection et planification de routes, résolution des conflits; et représentations spatiales online (orientation et positions propres, directions et distances égocentriques et allocentriques, progression de la route et buts de navigation) ou offline (mémoire des vues locales, représentations à long terme hiérarchisées de l'environnement,(Fig. 22).

Elle serait ainsi dépendante à la fois des fonctions visuo-spatiales à petite échelle (voir au dessus), du fonctionnement mnésique et exécutif.

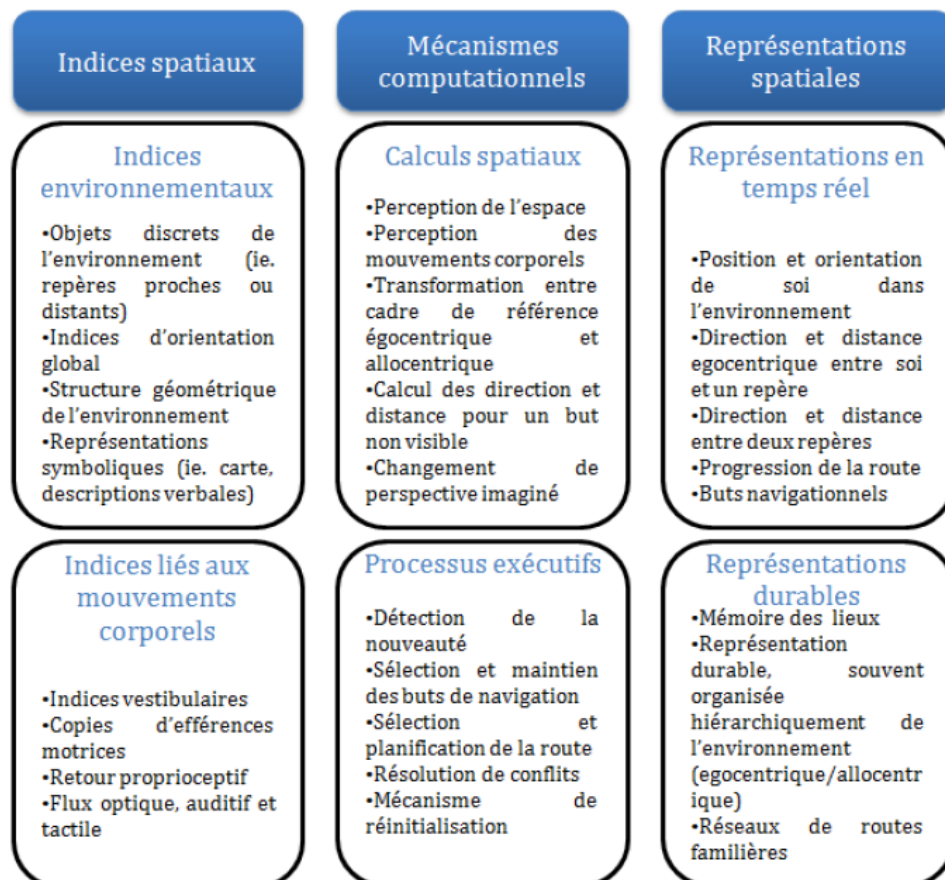


Figure 22: Vue d'ensemble des aptitudes associées à la navigation et l'apprentissage dans des grands espaces (Wolbers & Hegarty, 2010).

Ce modèle repose sur l'existence de différents niveaux connaissances de l'espace en accord avec de nombreux modèles développés dans la littérature (Montello, 1998 ; Siegel & White, 1975 ; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982).

II.4.a. Niveaux de représentation dans les grands espaces

II.4.a.1. Repères (Landmark, en anglais)

Les repères (appelés « landmarks » en anglais) représentent les éléments de l'espace pouvant servir de points de références, permettant de distinguer une position géographique. Ces repères doivent présenter des caractéristiques spécifiques leur permettant d'être plus facilement retenus que les autres éléments. Ils peuvent servir de points de références mentaux pour les différentes positions de l'environnement (Golledge, 1999; Waller & Lippa, 2007). Ils représentent des indices spatiaux, pouvant être associés à des cibles à atteindre, des réponses comportementales ou associés entre eux (Golledge, 1999; Stankiewicz & Kalia, 2007). Leurs propriétés doivent être la persistance, (rester présents toutes les fois que cet espace est traversé) ; visuellement saillant (facilement détectables et identifiables) et informatifs (devant indiquer sa position dans l'environnement et la direction qui doit être prise) (Stankiewicz & Kalia, 2007), ainsi que leur visibilité (locaux ou distants), fiabilité et saillance (pour revue, voir Gillner & Mallot, 2008 ; Ruddle, Volkova, Mohler & Bülthoff, 2011). Ces repères peuvent servir de point de référence (« centroïdes ») pour la partition ou le regroupement de régions de l'espace (Golledge, 1999) ou de « point d'ancrage », permettant une représentation hiérarchique de l'espace (Golledge, 1999).

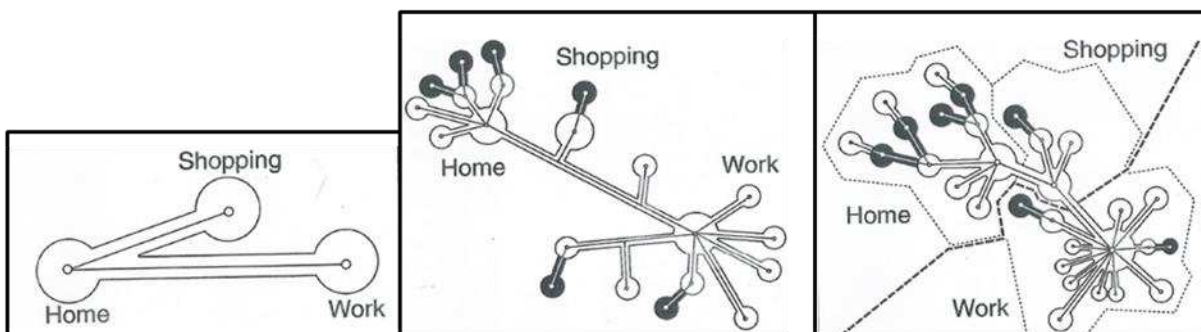


Figure 23 : Représentation schématique de la hiérarchisation des positions et des connexions des routes formant un réseau (Golledge, 1999)

II.4.a.2. Route

Ce niveau de représentation a été défini comme une séquence de positions ou de repères associées à des décisions (tourner à gauche, à droite...), permettant d'aller d'une destination à une autre (Siegel & White, 1975 ; Aguirre & d'Esposito, 1999 ; Allen, pp. 46), également comme une succession spatio-temporelle de repères (Wolbers, Weiller, & Büchel, 2004). Ce niveau de représentation a également été nommé « égocentrique », « graphe » ou « procédurale » selon les auteurs et pour certains reposeraient sur des représentations spatiales égocentriques (Aguirre & d'Esposito, 1999 ; Allen, 1999 ; pp. 46 ; Meilinger, 2008a, b). Ce niveau serait essentiellement linéaire, associant des repères et des changements de direction et a été associé à des apprentissages de type stimulus réponse et pouvant connecter différentes routes (Thorndyke & Hayes-Roth, 1982 ; Chown, Kaplan, & Kortenkamp, 1995). Elle pourrait pour certains présenter des informations métriques de distance et d'angle entre ses segments (Büchner & Jansen-Osmann, 2008; Ishikawa & Montello, 2006). Ces routes peuvent être interconnectées au fur et à mesure des apprentissages et intégrées pour former un réseau. Ce dernier peut, à son tour, servir de système de

référence local ou global, permettant de former une mosaïque géométrique (Golledge, 1999 ; pp. 19), contenant une hiérarchie de routes. Cet ensemble de routes pourrait servir d'ancrage pour une portion de la carte cognitive (ou représentations de type « survey » (Golledge, 1999 ; voir Fig. 23).

II.4.a.3. Configurationnel (en anglais, « Survey »)

Ce niveau de représentation, aussi appelé «carte cognitive» (Tolman, 1948 ; O'Keefe & Nadel, 1978) a été défini comme une représentation métrique, et intégrée de différentes positions d'un espace. Elle intégrerait des repères, des routes et des positions pouvant être éloignées les unes des autres dans un seul ensemble, dans un même référentiel allocentrique. L'intégration du niveau de représentation « Route » dans cette représentation reste débattu, certain la considérant incluse et nécessaire à l'acquisition du niveau « survey » et d'autre distincte de ce niveau de représentation et dépendante de processus d'apprentissage et de substrats neuronaux différents (Allen, 1999; pp. 70). Elle permettrait une représentation des directions et des distances de positions non visibles, également de prendre des raccourcis et de planifier des détours de navigation (Tolman, 1948 ; Golledge, 1999). D'autres terminologies ont été utilisées pour décrire ce niveau de représentation : configurationnel (Siegel & White, 1975), représentation en vecteurs (Byrne, 1982).

Ces représentations de l'espace ne seraient pas des copies exactes de l'espace réel et peuvent comporter des distorsions ou être incomplètes (Golledge, 1999 ; pp. 23). Les erreurs dans l'acquisition de ce niveau de connaissance peuvent intervenir durant l'encodage, la manipulation interne, le décodage ou la représentation des informations (Golledge, 1999). Les distorsions peuvent venir notamment de la tendance à représenter et distordre des intersections nouvellement apprises en angle droit (même celles de 60 ou 120° ; Meilinger, 2007; pp. 58). Il semble également que l'estimation de directions et de positions soient plus difficiles dans des environnements comportant des angles obliques que des angles orthogonaux, probablement dû au fait que ces angles obliques soient représentés et mémorisés comme des angles orthogonaux (Meilinger, 2007 ; pp. 58, autres sources distorsions, voir Meilinger, 2007 ; pp. 59). Une autre cause des distorsions peuvent venir du fait que deux positions peuvent être estimées plus éloignées qu'elles ne le sont réellement, lorsque celles-ci ne sont pas directement connectées par des routes ou des positions. Des positions qui ne sont pas exactement et réellement alignées peuvent également être représentées alignées en mémoire (Klippel, Knuf, Hommel & Freksa, 2005; Tversky, 1993). Les distorsions des représentations de l'espace peuvent provenir également des problèmes de perspectives, de hiérarchisation des représentations, des points de référence cognitifs utilisés, des rotations entre référentiels (pour revue voir Tversky, 1993 ; 2003).

II.4.b. Modèles d'acquisition des niveaux de représentations spatiales

Siegel & White (1975) ont proposé un modèle de développement des représentations spatiales à grande échelle chez l'adulte (aussi appelé « *Cognitive Mapping* » en anglais) qui a longtemps fait référence. Ce modèle est basé sur les hypothèses de Piaget (1967) concernant le développement des compétences spatiales chez l'enfant. Ils proposent que l'acquisition de la connaissance d'un nouvel environnement chez l'adulte s'effectue selon un processus sériel, en trois étapes, commençant par l'acquisition des repères (« Landmark » en anglais), puis de type « Route » (ie., connaissance du trajet), et enfin de type « Configurationnelle » (« Survey », en anglais) (Hayes-Roth, 1982, Tolman, 1948 ; O'Keefe & Nadel, 1978).

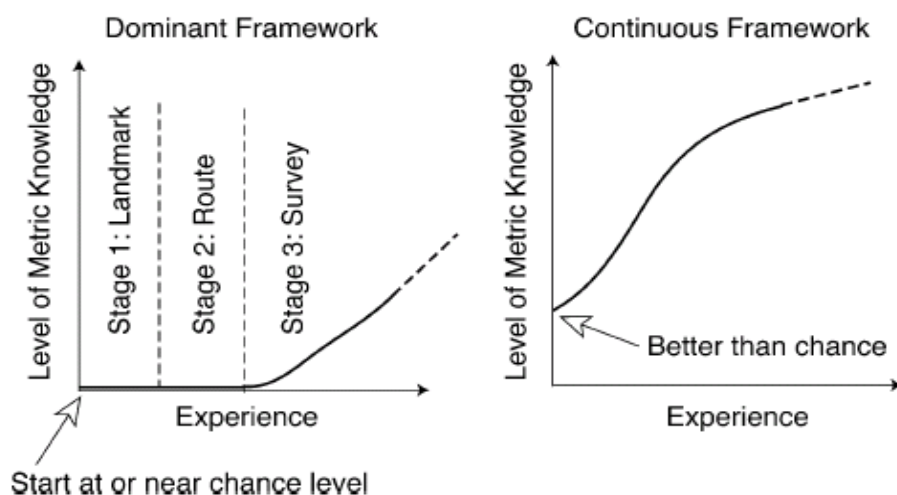


Figure 24: Représentation schématique des prédictions de modèles « dominant » (de Siegel & White, 1975) et « continu » (de Montello, 1998) du développement des représentations spatiales (Ishikawa & Montello, 2006).

Ce modèle est appelé «*modèle dominant*» par Montello (1998), qui propose de son côté que cette acquisition ne soit pas séquentielle et que des informations métriques puissent être acquises rapidement, dès les premiers apprentissages («*Modèle Continu*», voir Fig. 24). Ce ne serait pas la nature (Repères, Route, ou Configurationnel) qui changerait au fil des apprentissages, mais la qualité et la précision de ces 3 niveaux de représentations qui augmenteraient (voir Montello, 1998, pour plus de précisions), les connaissances de type «*route*» et «*survey*» étant acquises en parallèle.

Ce nouveau modèle est en partie confirmé par Ishikawa & Montello (2006), avec la démonstration expérimentale que des informations métriques entre positions éloignées peuvent être acquises précocement. Ils admettent également que ce modèle «*Continu*» ne fonctionne que pour les personnes ayant un bon sens de l'orientation (Hegarty et coll., 2006). En effet, des différences individuelles importantes ont été observées et seules les personnes ayant un bon sens de l'orientation (ou ayant de bonnes aptitudes à mettre à jour leur orientation pendant leurs déplacements) atteindraient le niveau de représentation «*Survey*» (Kozlowski & Bryant, 1977 ; Hegarty et coll., 2006). Une étude récente de Büchner & Jansen-Osmann (2008) semble également en faveur du modèle alternatif de Montello (1998), en montrant que des informations métriques peuvent être acquises précocement lors de l'apprentissage. Yeap & Jefferies (2001) proposent, de leur côté, que le développement des représentations de l'espace ne soit pas basé sur la création de relations spatiales entre objets (les repères) séparés, comme le propose le modèle de Siegel & White (1975), mais sur la création d'une représentation «*spatiale*» et de limites des environnements à partir des vues locales, dès les premiers apprentissages. La création de représentations de type «*Landmark*» serait plus abstraite et serait dépendante de la création précédente de la représentation de l'espace contenant ces repères (Yeap & Jefferies, 2001). La construction de la représentation d'un espace durant les déplacements se ferait par ajout des vues successives (appelées représentations spatiales absolues) et par leur mémorisation (appelée «*Memory For the Immediate Surroundings*», MFIS) combinées grâce à l'utilisation d'un cadre de référence centré sur l'environnement local, occupé par le sujet. Quand une vue locale est sortie de la «*MFIS*», elle peut être entrées dans une mémoire à long terme (Carte cognitive).

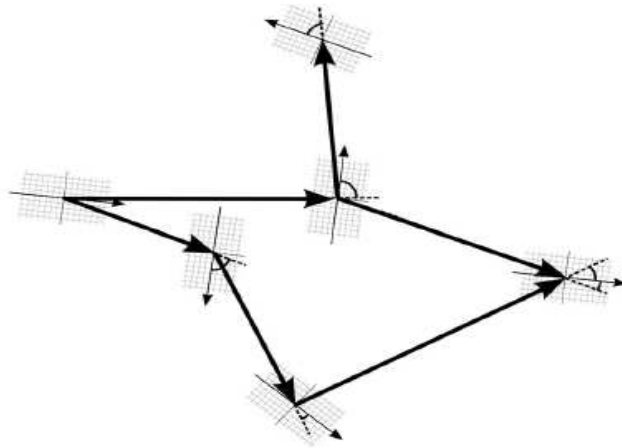


Figure 25: Représentation de la « Network of Reference Frame Theory ». Les cadres de références correspondent à des vues locales particulières ou des cadres imposés par la géométrie de l'espace local, connectés entre eux. Des mouvements de rotation et de translation permettent de passer d'un cadre de référence à un autre (Meilinger, 2008b).

Meilinger (2008b) propose une théorie basée sur la fusion entre les représentations de type « *Graphe* » (« *Route* ») et de type « *Carte Cognitive* » (« *Survey* »). Un graphe représente des unités multiples, des nœuds, eux même composés d'entrées sensorielles (vues locales) et interconnectées par des actions. Ce type de représentation serait la plus adaptée pour expliquer la navigation de type « *Route* » ou procédurale (séquence de vues et d'actions). La « *Carte Cognitive* » de son côté référerait à un seul cadre de référence allocentrique. Sa théorie, appelée « *Network of Reference Frames Theory* » propose une fusion des deux représentations de type « *Graphe* » et « *Carte cognitive* », qui serait alors composé d'un réseau de cadres de références. Ces cadres de références correspondent aux espaces visibles locaux (appelé « *vista sacae* », par les auteurs) rencontrées lors de l'apprentissage par locomotion, et représentent les nœuds de ce réseau. Dans ce modèle, l'environnement est encodé comme des cadres de références multiples interconnectés, chacun étant représenté comme un système de coordonnées avec une orientation spécifique, où les positions des objets et la géométrie de l'espace sont spécifiées. Ce réseau de cadres de référence serait stocké en mémoire à long terme, et plusieurs processus et opérations seraient à l'œuvre durant l'encodage, la réorientation pour la reconnaissance, et la navigation. Durant le premier apprentissage, les vues sont encodées et représentés selon des référentiels déterminés par ceux rencontrés la première fois (égocentriques) ou par la géométrie de l'espace visible (ces 2 référentiels correspondent le plus souvent). Après avoir encodé un cadre de référence particulier et s'être déplacé, le sujet encode une nouvelle vue, selon un nouveau cadre de référence. Un changement de perspective (rotation ou translation) permet de passer d'un cadre de référence au suivant. Ces changements de perspective peuvent s'effectuer grâce à l'utilisation des scènes visuelles, de la mise à jour spatiale (intégration de trajet durant la navigation entre ces deux cadres de référence) ou à partir des repères globaux visibles depuis ces deux espaces. La revisite de cet espace permet d'ajouter de nouveaux changements de perspectives et d'augmenter la précision et le poids des associations entre les changements de perspectives. Cette augmentation de la précision des changements de perspective correspond au passage d'une représentation de type « *Route* » à une représentation de type « *Survey* ». La précision de la représentation de type « *Survey* » est alors directement associée à la précision de ce changement de perspective. Après une première visite, les changements de perspective ne sont pas toujours précis, la seule représentation possible étant celle de type « *Route* », basée sur la succession de cadres de références indépendants.

Cette théorie semble donc en partie en accord avec le modèle classique de Siegel & White (1975) proposant que la représentation de type « *route* » se forme avant la représentation de type « *survey* ». La différence est que ce dernier niveau de représentation peut être atteint plus au moins rapidement selon le sens de l'orientation des individus (et donc des capacités de mise

à jour spatiale ou d'intégration de trajet) et des capacités de prise de perspective mentale. En effet, il semble que les sujets ayant un meilleur sens de l'orientation acquerraient le niveau « survey » plus rapidement (Kozłowski & Bryant, 1977; Hegarty et coll., 2006; Ishikawa & Montello, 2006). Cette proposition semble également en accord avec le modèle de Montello (1998) et les conclusions de l'étude d'Ishikawa & Montello (2006), montrant de grandes différences interindividuelles dans la vitesse d'acquisition du niveau de représentation de type « survey ». Elle est également en accord avec les études montrant que l'intégration de trajet, très associé au concept de sens de l'orientation (Bakker, 2001 ; Gallistel & Cramer, 1996) et la prise de perspective mentale (Kelly, Avaramides & McNamara, 2010) favorisent l'acquisition de ce niveau de représentation spatiale (voir aussi Chrastil & Warren, 2012).

II.5. Locomotion, Apprentissages « Actif/Passif » et Cognition spatiale

Introduction

L'effet des apprentissages « actif/passif » sur la mémorisation de grands espaces est abordée depuis longtemps et a fait l'objet de nombreuses études grâce à la réalité virtuelle (pour revue voir, Chrastil & Warren, 2012). Les premières études rapportant un effet positif des activités sensori-motrices sur la mémoire spatiale reposent sur l'observation d'une acquisition plus efficace de représentations de type « survey » chez des conducteurs (actifs) par rapport à des passagers (passifs) de bus (Appleyard, 1970; voir aussi Maguire, Woollett, & Spiers, 2006).

Les nombreuses études dans ce domaine ont permis de distinguer différentes composantes, intervenant lorsque l'activité est « physique » ou « cognitive » (Chrastil & Warren, 2012).

Les résultats obtenus dans les études portant sur l'effet « actif-passif », lors des apprentissages dans des grands espaces, peuvent être la combinaison de ces différents facteurs (Wilson, Forman, Gillett, & Stanton, 1997). La revue de Chrastil & Warren (2012) avait pour but de déterminer leurs rôles relatifs dans la mémorisation de scènes visuelles ou de séries d'objets dans des petits espaces, l'acquisition des représentations de type « Landmark », « Route » et « Survey » dans des grands espaces, dans la mise à jour spatiale et l'intégration de trajet (ces deux derniers mécanismes, participant à la navigation et le développement des représentations de type « Survey », sont très associés, le premier représentant la mise à jour de sa position par rapport à un ensemble d'objets préalablement mémorisés, le second la mise à jour en rapport à une position initiale).

Les limitations dans ce domaine d'étude viennent du fait que l'effet « actif-passif » est en fait le résultat de la combinaison de plusieurs composantes dont les effets ne sont pas systématiquement contrôlés dans les études.

II.5.a. Composantes « motrices » (Intégration de trajet)

Quel que soient les modèles ou les descriptions, l'intégration de trajet joue un rôle important dans la navigation, que ce soit pour l'acquisition des connaissances spatiales ou la mise à jour de sa position et son orientation durant la navigation (Gallistel & Cramer, 1996; Bakker, 2001). L'intégration de trajet (« *path integration* » en anglais), entrerait en jeu dans la navigation, notamment en l'absence totale de repères (Etienne, Maurer, & Séguinot, 1996). Elle permet le retour direct à l'origine du parcours lors d'un déplacement. Elle repose sur l'intégration d'un ensemble d'informations relatives aux mouvements du corps. Ces informations liées aux mouvements du corps proviennent principalement de quatre sources différentes (Hegarty et coll., 2006 ; Israël, Grasso, Georges-François, Tsuzuku, & Berthoz, 1997 ; Loomis, Klatzky, Golledge & Philbeck, 1999 ; Waller, Loomis, & Haun, 2004): les informations en provenance du flux optique, celles émanant du système vestibulaire, d'origine kinesthésique et les copies efférentes motrices (Wolpert, Miall & Kawato, 1998). Les informations en provenance du système vestibulaire, proprioceptives et les copies efférentes motrices sont souvent regroupées sous le

terme informations idiothétiques. Le flux optique se définit comme l'ensemble des entrées visuelles dynamiques (déteçant en fonction de la position du corps, les mouvements des formes, des textures, points de repères d'objets, etc.) (Gibson, 1950) selon deux axes : l'axe translationnel, relatif aux mouvements exécutés d'avant en arrière sans changement d'orientation, et l'axe rotationnel, relatif aux mouvements en lien avec des changements d'orientation de la tête (Bardy, 2006 ; Kearns, Warren, Duchon, & Tarr, 2002). Les informations en provenance du système vestibulaire, se décomposent aussi en informations translationnelles (accélération/décélération de la tête et du corps) et rotationnelles (rotation de la tête et du corps). Enfin, les informations kinesthésiques correspondent au retour proprioceptif en provenance des muscles et des tendons, et les copies efférentes motrices aux copies des commandes motrices venant des aires motrices cérébrales (Bardy, 2006 ; Waller, Loomis, & Haun, 2004). Ce mécanisme est classiquement étudié par des tâches de complétion de triangle, où les sujets doivent parcourir deux segments d'un trajet, séparés par un changement de direction et retourner à l'origine par le chemin le plus direct.

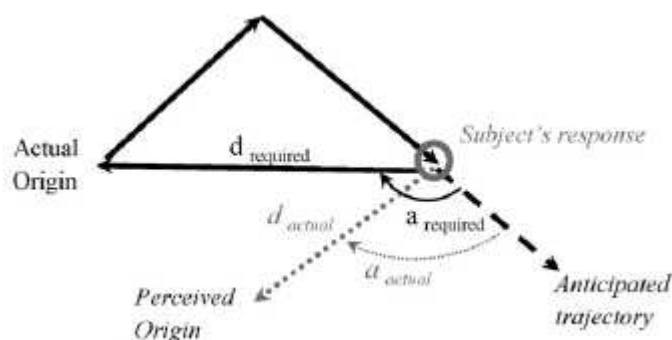


Figure 26: Tâche de complétion de triangle utilisée classiquement pour l'étude de l'intégration de trajet (Mahmood et coll., 2009).

L'intégration de trajet est également très associée au concept de sens de l'orientation (« *sense of direction* » en anglais) dont la littérature est abondante (ex, Hegarty et al., 2002, 2006; Sholl, Kenny, & DellaPorta, 2006).

Le rôle des informations idiothétiques et ses différentes composantes, entrant en jeu dans l'intégration de trajet à fait l'objet de nombreuses études (Chrastil & Warren, 2012) :

Les copies efférentes motrices, sont mises en jeu lorsque les déplacements sont contrôlés, que ce soit par la marche, ou l'utilisation d'un interacteur (manette, volant...).

Les réafférences proprioceptives et vestibulaires sont mises en jeu lors des déplacements physiques. Elles sont plus ou moins présentes en fonction des types d'interacteur ou de déplacements (marche, conduite, tapis roulant, visuo-casque...).

Ces différents canaux sensoriels fournissent des informations sur les mouvements de translation et de rotation du corps et de la tête durant les déplacements.

Les conclusions principales que Chrastil & Warren (2012) ont tirées de l'ensemble des études sont :

- 1) Les informations idiothétiques joueraient un rôle à la fois dans la mise à jour spatiale dans des petits espaces, l'intégration de trajet, participant elles-mêmes à l'acquisition des connaissances de type « survey » (les informations motrices, proprioceptives et vestibulaires jouent toutes un rôle mais leurs contributions relatives restent à établir). Ces informations seraient plus importantes que celles provenant du flux optique.
- 2) Les informations motrices et proprioceptives semblent jouer un rôle dans l'acquisition des connaissances de type « route » (permettant de spécifier les angles et les distances de rotation et une meilleure association entre les positions et les actions).
- 3) Le rôle des informations idiothétiques dans l'acquisition de connaissances de la séquence des repères ou des objets ou moins développées (mémoire d'un ensemble d'objets dans un petit espace ou des repères) reste à établir.

II.5.b. Composantes « cognitives »

Nous nous proposons de présenter une synthèse des principaux résultats portant sur les composantes cognitives suivantes :

- 1) L'orientation de l'attention vers des éléments de l'environnement nécessaires à la navigation (apprentissage intentionnel vs incident)
- 2) Les décisions cognitives portant sur les directions prises lors de l'apprentissage (apprentissage libre vs guidé).
- 3) Les différentes formes de mémoire de travail (verbale, visuelle et spatiale séquentielle ou simultanée).

Les principaux résultats concernant ces composantes sont les suivants :

Pour le moment, il semble que la prise de décision en l'absence d'informations idiothétiques ne contribue pas à l'acquisition de connaissances spatiales de type « survey », les études ayant été réalisées dans des EV à l'aide d'interacteur, fournissant moins d'informations idiothétiques que la marche (voir aussi les études préliminaires de Chrastil & Warren, 2011).

L'orientation de l'attention vers les informations spatiales importantes dans la navigation participerait à l'acquisition des connaissances de type « route » (association entre positions et actions) et « survey ».

L'encodage des repères, de la séquence des repères, et probablement de la relation entre les repères semble incident (dans des protocoles de comparaison d'apprentissage incident vs. Intentionnel).

L'orientation de l'attention vers l'association entre positions et actions faciliterait l'acquisition des niveaux « route » et « survey ».

L'orientation de l'attention vers les informations configurationnelles ne faciliterait pas l'acquisition des connaissances de type « route ».

L'acquisition des niveaux de connaissances spatiales semble également être sous l'influence des différentes composantes de la mémoire de travail :

La mémoire de travail verbale et la mémoire de travail spatiale séquentielle seraient impliquées dans la mémoire de route.

Les composantes impliquées dans l'acquisition des connaissances de type « survey » par la navigation ne sont pas connues.

La manipulation active d'informations spatiales faciliterait l'apprentissage de nouveaux espaces.

Le contrôle sensorimoteur (contrôle de la conduite, et posture et équilibre pendant la marche) demande des ressources en mémoire de travail. Dans une situation de double tâche (sensorimotrice et cognitive), les performances pour les tâches cognitives dont la mémoire spatiale (encodage des repères, de routes...), peuvent être affectées, spécialement chez les personnes âgées.

Les résultats des études sont synthétisés dans les tableaux (8 à 9) pour le rôle des informations idiothétiques prises ensemble et le rôle plus spécifique des copies efférentes motrices. Les tableaux décrivent les conclusions des études en fonction des types d'informations fournies (idiothétiques : copies efférentes motrices, informations proprioceptives et vestibulaires), de la prise de décision ou non pendant l'apprentissage, de l'attention (encodage intentionnel ou incident), du type de mémoire de travail (verbal, visuel ou spatial), sur l'acquisition des représentations de type « Landmark », « Route » et « Survey » dans des grands espaces, la mise à jour spatiale et l'intégration de trajet. Ils présentent également les quelques études portant sur l'étude des situations de double tâche de marche et de navigation.

Tableau 8: Récapitulatif des études sur le rôle des informations idiothétiques (copies efférentes motrices, infos proprioceptives et vestibulaires) dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale.

	Reconnaissance de scènes visuelles/ Mémoire d'objets ou de la position d'objets	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Repères »	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Route »	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Survey »	Mise à jour spatiale	Intégration de trajet
Informations Idiothétiques (Copies efférentes motrices, informations vestibulaires et proprioceptives prises ensemble)			<p>Grant and Magee (1998): Réel (marche) > Virtuel (marche sur place) > Virtuel (joystick) >> Rôle positif</p> <p>Kalia et al. (2008) : Marche en réel = RV (bouton clavier) chez jeunes et âgés; prise de décision et attention contrôlées >> Infos idiothétiques non nécessaires (mais environnement petit)</p> <p>Ruddle & Lessels (2009): Marche > Rotation physique et Translation par joystick > Joystick (rot° + transl°) >> Rôle positif (mais environnement de petite taille et artificiel)</p>	<p>Grant and Magee (1998): Réel (marche) > Virtuel (marche sur place) > Virtuel (joystick) >> Rôle positif</p> <p>Chance et al., 1998; Waller & Greenauer, 2007: Effet positif quand les apprentissages sont répétés</p> <p>Richardson et al., 1999: Apprentissage Réel > Virtuel >> Rôle positif</p> <p>Riecke et al. (2010): Effet positif pour les rotations seules</p> <p>Mellet et al. (2010) : Marche = Joystick dans un EV simple (couloirs) >> Rôle positif</p> <p>Waller, Loomis, and Haun (2004): Marche + HMD⁵ > Assis + HMD ; >> Informations proprioceptives et vestibulaires nécessaires</p>	<p>Waller and Greenauer (2007): Marche > Chaise roulante (visual and vestibular information) = Statique (infos visuelles seules) >> Effet positif uniquement pour un grand nombre de changements de direction</p> <p>Rieser, Guth, and Hill (1986) : Déplacement physiques plus efficaces que déplacements imaginés >> Informations proprioceptives and vestibulaires nécessaires</p>	<p>Keams (2003): Rendent compte de 85% des erreurs de distance et de rotation (15 % pour le flux optique)</p> <p>Tcheang et al. (2011): Contribution majeure >> Mise à jour automatique; infos idiothétiques et visuelles combinées en représentation uni-modale (infos idiothétique plus important que flux optique)</p> <p>Klatzky et al. (1998): Marche (Infos Idiothétiques + Visuelles) > Vues simple (Infos visuelles seules) >> Rôle important</p>

II.5.c. Effet double-tâche « contrôle moteur et cognitif »

Dans le domaine de l'étude de la relation entre activités sensorimotrices et cognition spatiale, on peut également noter le rôle possible de la compétition entre les contrôles sensorimoteur et cognitif durant la navigation chez la personne âgée (Lövdén et al., 2005 ; Shellenbach et al., 2010), phénomène non évoqué dans la revue de Chrastil & Warren (2012). En effet, dans d'autres domaines que la mémoire spatiale ou la navigation, il a été constaté une compétition entre les contrôles sensorimoteur et cognitif, lors de la réalisation de double tâches simultanées sensorimotrices et cognitives chez les personnes âgées (Li, Krampe & Bondar, 2005 ; Schäfer & Huxhold & Lindenberger, 2006). Elle peut aboutir à une altération des performances aux tâches cognitives et sensorimotrices, ou une priorization du contrôle sensorimoteur sur le contrôle cognitif, aboutissant à une diminution des performances à la tâche cognitive (Lindenberger, Marsiske & Baltes, 2000 ; Li, Krampe & Bondar, 2005 ; Verrel, Lövdén, Shellenbach, Schaefer & Lindengerger, 2009). Ce phénomène a également été constaté lors de la réalisation d'une tâche de mémorisation d'un EV, pendant la marche sur un tapis roulant (Lövdén et al., 2005 ; Shellenbach et al., 2010).

⁵ HMD : Visuo-casque (Head Mounted Display, en anglais)

Tableau 9: Récapitulatif des études sur le rôle des copies efférentes motrices, dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale.

	Reconnaissance de scènes visuelles/ Mémoire d'objets ou de la position d'objets	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Repères »	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Route »	Mémoire spatiale dans des grands espaces : Niveau « Survey »	Mise à jour spatiale	Integration de trajet
Copies efférentes motrices / Contrôle moteur	<p>Attree et al., 1996; Brooks, Attree, Rose, Clifford, & Leadbetter, 1999; Rose, Brooks & Attree, 2002: Attention orientée vers objets ; Actif (joystick) < Passif (vue passive) ; Rq : effets confondus de la prise de décision ; du contrôle moteur et de l'attention.</p>	<p>Péruch, Vercher, and Gauthier (1995): Actif (Joystick) > Passif (Vue passive) (effet confondus du contrôle moteur et de la prise de décision)</p>	<p>Péruch, Vercher, and Gauthier (1995): Actif (exploration libre Joystick) > Vue passive (effet du contrôle moteur et de la prise de décision confondus)</p>	<p>Pugnetti et al., 1998: Actif (Joystick) > Passif (Vue passive); apprentissage incidents deux conditions (effet confondus de la prise de décision et du contrôle moteur)</p> <p>Attree et al., 1996; Brooks, Attree, Rose, Clifford, & Leadbetter, 1999; Rose, Brooks & Attree, 2002: Attention orientée vers objets ; Actif (Joystick) > Passif (Vue passive) ; Rq : effets confondus de la prise de décision ; du contrôle moteur et de l'attention.</p>	<p>Wraga, Creem-Regehr, and Proffitt (2004): Rôle faible comparé aux informations vestibulaires</p>	<p>Allen, Kirasic, Rashotte, and Haun (2004): Non essentielles pour les personnes âgées</p> <p>Thomson & Perrone (2010): Simulateur de conduite ; Intégration de trajet visuelle; Rotation contrôlée ou non (volant) : Flux optique suffisant ; Effet positif du contrôle de la rotation</p>
	<p>Hahm et al., 2007: Reconnaissance de scènes: Actif > Passif (effet de la prise de décision et du contrôle moteur confondus)</p>	<p>Sandamas & Foreman, 2007: Conducteur > Passager (pas de prise de décision)</p>	<p>Carassa et al. (2002) and Farrell et al. (2003): Actif (exploration libre) = Passif (vue passive, route guidée) (scènes visuelles non appariées; effet confondu du contrôle moteur et de la prise de décision).</p>	<p>Sandamas et al., 2003: enfants; Actif (exploration libre clavier) = Vue passive (effet de la prise de décision et du contrôle moteur confondus)</p> <p>Sandamas et al., 2007: Protocole similaire: Passif > Actif</p>	<p>Wang and Simons (1999): Contrôle rotation = Vue rotation table >> Aucun rôle</p>	
	<p>Plancher et al., 2008: Conduite vs Vue passive (Passager) : Mémoire de la position d'objets (par rapport au corps): >> Aucun rôle (peu d'information prop, aucune informations vest)</p>	<p>Pugnetti et al., 1998: Mémoire de la position d'objets après navigation Joystick (exploration libre) < Vue passive : (effet de la prise de décision et du contrôle moteur confondus)</p>	<p>Cutmore et al. 2000: Apprentissage dans un labyrinthe virtuel; Actif (souris) = Passif (vue passive) >> Aucun rôle</p> <p>Plancher et al., 2008: Mémoire de la position d'objets (sur une route) et changements de direction >> Aucun effet (peu d'information prop, aucune informations vest)</p>	<p>Sandamas et al., 2009: Enfants; Actif (Joystick) > Passif (Vue passive) (Si entraînement à l'utilisation du Joystick)</p> <p>Péruch & Wilson, 2004: Actif (Exploration libre ; Space mouse) > Passif (Vue passive): (effet prise de décision et contrôle moteur confondus)</p>	<p>Féry et al. (2004): Joystick (commande motrice) > Rotations passives (Infos vestibulaires) >> Plus forte contribution durant une rotation que les informations vestibulaires</p>	
<p>Gaunet et al. (2001): Actif (Joystick) = Passif (Vue passive) vs Vues statiques photos : >> Aucun rôle (mais pas d'infos prop et vest)</p>	<p>Von Stülpnagel & Steffens (2012) : Réel ; Carte route avec ou sans parcours / Conducteur vs Passager: Plus important que la prise de décision</p>	<p>Forman et al., 2004: Mémoire de la position d'objets le long d'un couloir ; Actif = Passif (effet de la prise de décision et du contrôle moteur confondus)</p> <p>Gaunet et al. (2001): Joystick = Vue passive = Vues statiques photos : >> Aucun rôle (mais pas d'infos prop et vest)</p>	<p>Sandamas & Foreman, 2007: Actif (Conducteur) < Passif (Passager) (effet possible compétition ressources en MT pour contrôle moteur et cognitif); prise de décision contrôlée</p>		<p>Gaunet et al. (2001): Actif (Joystick) = Passif (Vue passive) >> Aucun rôle (mais pas d'infos prop et vest) >> Flux optique peut être suffisant</p>	

II.5.d. Questions ouvertes

On peut également conclure de l'ensemble de ces études différentes pistes de recherches :

Des études supplémentaires en condition de marche (en condition réelle ou avec des tapis roulant) seraient nécessaires pour vérifier le rôle de la prise de décision, lorsque les informations proprioceptives et vestibulaires sont disponibles (voir les études préliminaires de Chrastil & Warren, 2011a, b).

Le rôle des copies efférentes motrices et des informations proprioceptives dans la mémoire de route reste à vérifier.

De manière plus générale, le rôle respectif des informations idiothétiques (copies efférentes motrices, informations proprioceptives et vestibulaires) et du flux optique dans l'intégration de trajet, la mise à jour spatiale et l'apprentissage d'un nouvel espace (les trois niveaux de connaissance Repères, Route et Survey) reste à préciser, même s'il semble que les informations idiothétiques jouent un rôle plus important que le flux optique.

La relation entre la prise de décision et l'orientation de l'attention d'une part et l'absence ou la présence d'informations idiothétiques pendant l'apprentissage reste aussi à préciser.

Les études portant sur l'effet « double-tâche » (sensorimotrice vs cognitive) et testant la combinaison « mémoire spatiale » et « marche » restent peu nombreuses, bien que cette situation soit très courante au quotidien (Lövdén et al., 2005; Schellenbach et al., 2010).

L'effet de cette condition de « double-tâche » (sensorimotrice/mémoire spatiale) pourrait être testé sur les différents niveaux de connaissance et également en situation de conduite, notamment chez les personnes âgées.

Les études portant sur les changements d'activités cérébrales liées aux différentes composantes de l'apprentissage actif sont peu nombreuses, pour le moment. Seuls Voss, Gonsalves, Federmeier, Tranel, & Cohen (2011) ont étudié le rôle du contrôle volontaire (prise de décision) du déplacement d'objets sur leur mémorisation et celle de leurs positions (sur un écran 2D), et leurs répercussions sur les changements de connectivité entre l'hippocampe et les autres régions cérébrales (corrélation entre activations des structures). Cet effet du contrôle volontaire a été testé chez des jeunes « contrôles » et des patients souffrant d'amnésie hippocampique. Ils ont montré un rôle positif du contrôle volontaire des déplacements d'objets sur leur mémorisation, la mémorisation de leur position, ainsi que sur l'activité et la connectivité de l'hippocampe avec d'autres structures cérébrales (cortex préfrontaux dorso-latéraux et médians bilatéraux, cortex pariétal ventro-latéral gauche et cervelet). Cet effet bénéfique sur la mémoire et les changements de connectivités cérébrales est en revanche supprimé chez des patients souffrant d'amnésie hippocampique. Ces résultats semblent confirmer le rôle de l'hippocampe dans l'effet avantageux de la prise de décision et la planification sur la mémoire.

II.6. « Wayfinding » : Classifications et stratégies de planification dans les grands espaces

Introduction

Le terme « wayfinding » a été décrit comme un comportement motivé, volontaire, dirigé vers un but, d'un point de départ vers une destination invisible par la personne se déplaçant (Allen, 1999; Golledge, 1999; Wiener et al. 2009). Le but de cette activité serait d'atteindre une destination spécifique, dans certaines contraintes spatiales et temporelles (Allen, 1999; pp. 47). Elle prend place dans des grands espaces et requière de résoudre des problèmes, impliquant des prises de décision explicites, de sélectionner des routes, de s'orienter vers de repères non visibles, planifier des routes ou des séquences de routes en utilisant plusieurs niveaux de connaissances spatiales (Spiers & Maguire, 2008; Wiener et al., 2009; Wolbers & Hegarty, 2010).

II.6. Stratégies de navigation et taxonomie des tâches de type « Wayfinding »

II.6.a. Stratégies de type « Procédurale » ou basée sur une « Carte Cognitive »

Une distinction souvent rencontrée dans la littérature, repose sur la distinction entre les stratégies de navigation dites « égocentriques » et « allocentriques » (Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003; Iaria, Petrides, Dagher, Pike, & Bohbot, 2003 ; Iglò, Zaoui, Berthoz & Rondi-Reig, 2009). La première serait basée sur une représentation de type « stimulus-réponse », et la seconde sur l'utilisation d'une représentation de type « Carte cognitive ». Cette distinction a pris les terminologies « *Response* » versus « *Place* » dans les études chez l'animal Packard & Knowlton,

(2002). Elles sont dépendantes respectivement des systèmes de mémoire « procédurale » et « déclarative », et elles-mêmes dépendantes respectivement et principalement du fonctionnement des noyaux gris centraux et de l'hippocampe (Iaria et coll., 2003 ; Hartley et coll., 2003). Cette distinction suppose que les mécanismes et les supports neuro-anatomiques d'acquisition et d'utilisation de ces deux représentations de l'espace soient indépendants (contrairement au modèle de Siegel & White, 1975).

II.6.b. Taxonomie des tâches de type « Wayfinding »

Concernant les études portant sur les humains, différentes classifications ont été proposées au cours de ces dernières années (pour revue, voir Wiener, Büchner, & Hölscher, 2009).

Wiener, Büchner, & Hölscher (2009) ont proposé une nouvelle taxonomie des tâches de type « wayfinding », qui serait une extension de modèles précédents (Allen, 1999 ; Mallot (1999 ; Montello, 2005) selon différents critères : la présence d'une aide extérieure, la présence d'une destination spécifique et les niveaux de connaissances spatiales (repères, route ou survey) acquis par le sujet naviguant (Fig. 27). Le premier critère de distinction, l'absence ou présence d'aides externes, joue un rôle important dans les processus nécessaires à la navigation. La navigation consistant à suivre des signes ou des panneaux est plus simple que de naviguer à partir de représentations à long terme. La navigation avec une carte par exemple, nécessite d'identifier des symboles, de tourner des objets, de se positionner dans cette carte, d'aligner son orientation propre sur celle de la carte et de mettre à jour cette orientation durant les déplacements. Les processus cognitifs (prise de décision, processus mnésiques et d'apprentissage, planification) mis en jeu dans la navigation aidée, sont externalisés sur la carte « physique » utilisée.

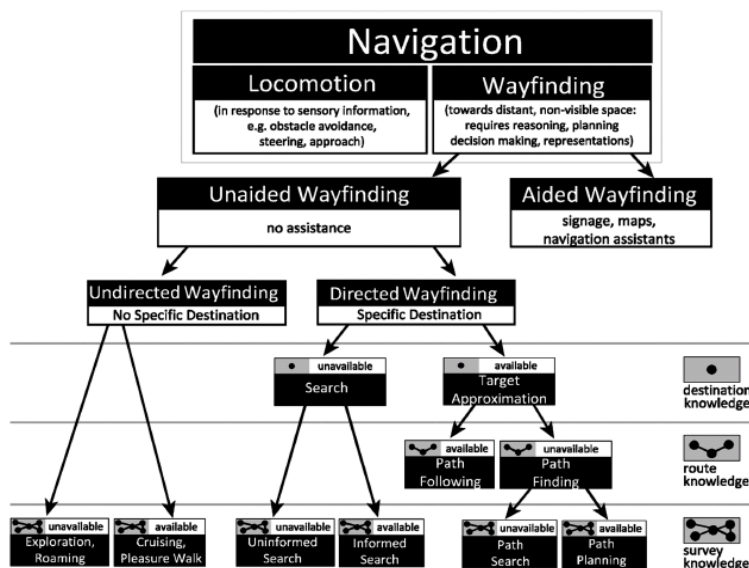


Figure 27 : Représentation schématique de la taxonomie des activités de type « Wayfinding » proposée par Wiener et coll. (2009).

Par exemple, la navigation « sans aide », peut être à son tour classée en fonction de la présence ou l'absence d'un but de navigation. Cette navigation sans aide et sans but, correspondrait à la phase d'exploration d'un environnement ou à une simple promenade. Les navigations avec ou sans but, peuvent être à leur tour séparées selon l'acquisition préalable des différents niveaux de connaissances spatiales : connaissance de la destination, des routes pour l'atteindre et connaissances de type carte cognitive (ou survey).

Ils admettent tout de même que des études supplémentaires seront nécessaires pour identifier les processus impliqués dans ces différents types de tâches, que leur taxonomie est en fait basée surtout sur l'usage des différents niveaux de représentation plutôt que sur les niveaux représentations spatiales acquis. Ils supposent également que la navigation « aidée » et « non-

aidée » doivent être très différentes. Le but de cette taxonomie était de classer les tâches de type « Wayfinding » possibles, afin de permettre l'étude détaillée des différents processus impliqués. Une classification récente de Arleo & Rondi-Reig (2007), propose de décrire différentes stratégies de navigation, en fonction de la visibilité du but, du type d'informations nécessaires (idiothétiques ; proprioceptives, vestibulaires et copies efférentes motrices ou allothétiques ; essentiellement visuelles) et des cadres de références spatiaux (égocentriques ou allocentriques) mis en jeu, ainsi que la flexibilité permise par ces stratégies de navigation. Par exemple, la stratégie de navigation basée sur l'approche de cibles ou de balises (« Beacon ») où les cibles sont visibles, reposeraient sur des informations allothétiques, égocentriques et serait la moins flexible. La stratégie la plus flexible serait la stratégie basée sur une « Carte cognitive » (« Map-based ») de référentiel allocentrique et reposerait sur des informations idiothétiques et allothétiques.

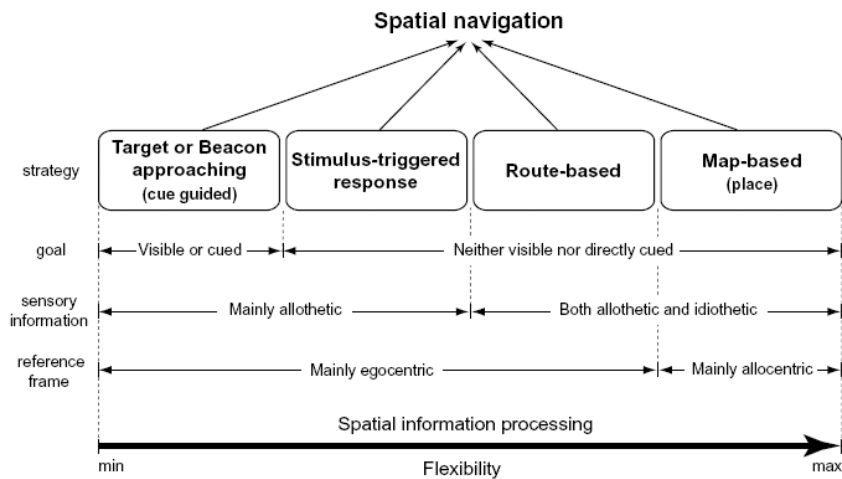


Figure 28 : Taxonomie des stratégies de navigation proposée par Arleo & Rondi-Reig (2007).

II.7. Modèles cognitifs de l'activité de navigation

II.7.a. Burns (1998)

Le modèle développé par Burns (1998) est issu de la composition de modèles déjà proposés, et a pour but de s'appliquer à la conduite (Fig. 29). En arrivant à un point de décision, le conducteur doit résoudre l'incertitude de la décision en utilisant des informations spatiales présentes à cette intersection et à partir d'informations stockées en mémoire (Carte cognitive). Les informations stockées dans la « Carte cognitive » sont les distances positions, orientation, repères, segments de routes et points de décision. Une fois la décision prise, le conducteur doit exécuter l'action au point de décision. Ce processus se répète à chaque fois que le conducteur éprouve de l'incertitude dans sa progression le long de la route

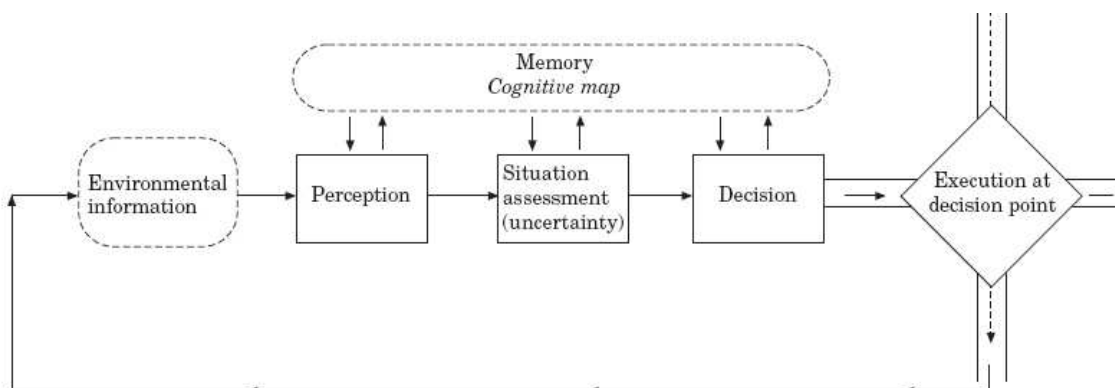


Figure 29: Modèle de navigation proposé par Burns (1998) s'appliquant à la conduite automobile.

II.7.b. Ishikawa Fujiwara, Imai & Okabe (2008)

Le modèle de Ishikawa, Fujiwara, Imai & Okabe (2008) propose qu'avant de naviguer, il est nécessaire de s'orienter dans l'espace (déterminer leur position et leur orientation) à partir de sa perception de l'environnement, de planifier la route en prenant en compte la position de la destination et enfin d'exécuter le trajet planifié. A chacune de ces étapes, il est possible de se référer aux connaissances spatiales stockées en mémoire à long terme (carte cognitive) ou à des aides externes (cartes, GPS...).

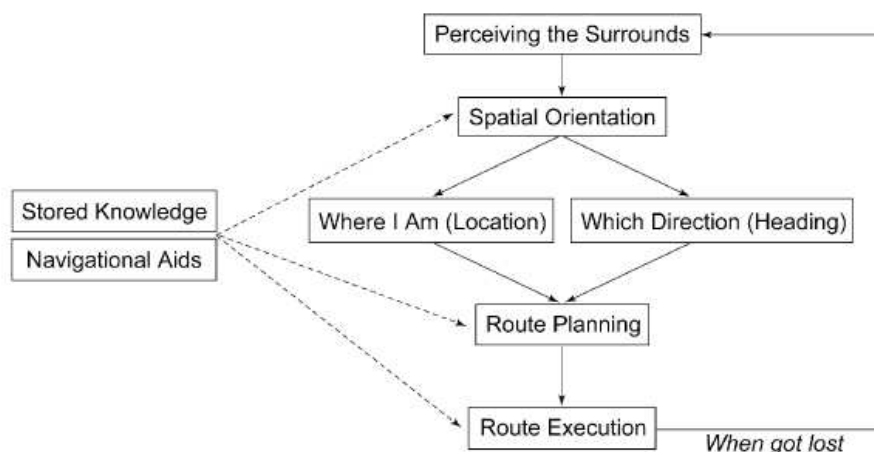


Figure 30: Représentation schématique du modèle de navigation proposé par Ishikawa, Fujiwara, Imai & Okabe (2008).

II.7.c. Bakker (2001)

Le modèle proposé par Bakker (2001) a pour objectif de décrire les différents mécanismes à l'œuvre durant une tâche de navigation dans un environnement virtuel. Ce modèle repose sur l'utilisation d'une carte cognitive, définie comme l'ensemble des représentations spatiales à long terme permettant de naviguer et de s'orienter correctement (correspondrait à celle de Thorndyke et Hayes-Roth, 1982). Un opérateur (personne navigant) doit se référer à ses connaissances spatiales à long terme (carte cognitive), afin de décider des mouvements et les exécuter. La décision de la route à suivre (que l'on peut appeler planification) nécessiterait la récupération d'information à long terme, stockées dans la carte cognitive (Fig. 31).

Afin que le navigant détermine sa position et son orientation dans l'environnement à chaque instant, un processus de mise à jour est nécessaire, reposant sur trois mécanismes distincts :

- la reconnaissance des repères
- l'anticipation cognitive : la combinaison des connaissances déjà acquises et les actions projetées ou les actions réelles peuvent être utilisées pour inférer ses positions futures. L'anticipation est associée aux processus de décisions et de sélection de la réponse.
- l'intégration de trajet interviendrait dans le processus de mise à jour, lorsque la reconnaissance (absence de repères) et l'anticipation cognitive ne sont pas possibles.

C'est lorsque ces processus de mise à jour échouent, que la désorientation apparaît.

Il est à noter que ce modèle a été conçu pour s'appliquer à la navigation dans des EV et que le type d'interaction avec l'environnement virtuel est très important pour le type d'informations permettant l'intégration de trajet (kinesthésiques, vestibulaires ou proprioceptives) et pourrait très bien s'appliquer à la navigation en condition réelle.

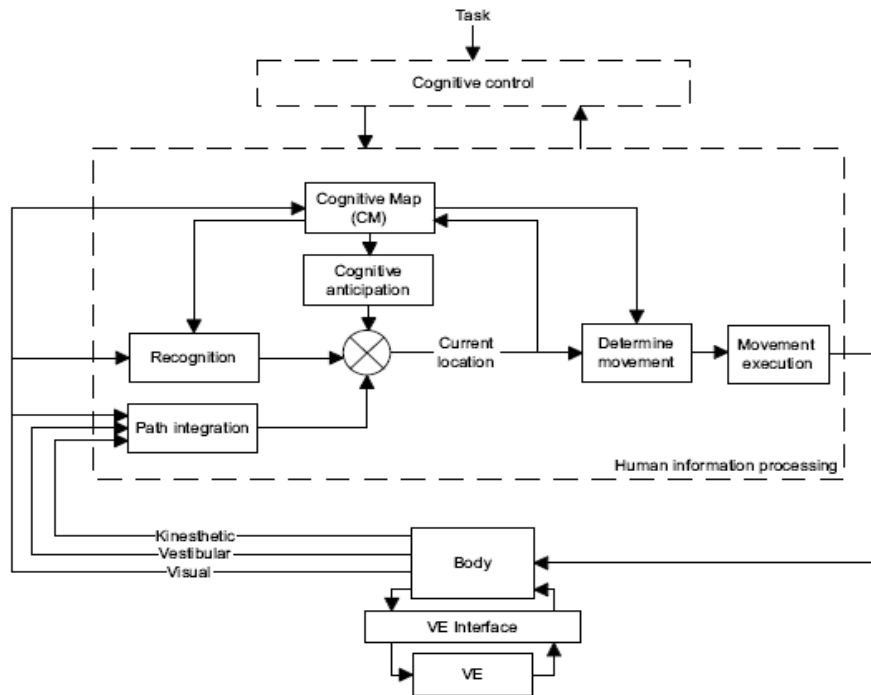


Figure 31 : Représentation schématique du modèle de navigation et d'orientation spatiale proposé par Bakker (2001).

II.8. Bases neurales de la cognition spatiale dans les grands espaces

De manière intéressante, la RV permet aujourd'hui l'étude des bases neurales de la cognition spatiale à grande échelle, en dépassant le verrou technologique inhérent aux techniques d'imageries neuro-fonctionnelle difficilement utilisables en situation naturelle. L'ensemble des travaux indiquent que les activités spatiales à grande échelle couvrent un circuit neural large incluant l'hippocampe, gyrus parahippocampique, le cortex pariétal et le gyrus cingulaire postérieur et confirment les données en provenance des études lésionnelles et électro-physiologiques chez l'animal (pour revue, voir Burgess, 2008 ; Grön, Wunderlich, Spitzer, Tomczak & Riepe, 2000; Spiers & Maguire, 2007 ; voir Kravitz, Saleem, Baker, & Mishkin, 2011 ; comme revue récente).

Byrne, Burgess & Becker (2007) ont proposé un modèle d'interaction entre le cortex pariétal, le lobe temporal médian, et le cortex retrosplenial, expliquant les relations entre les mémoires à court et long terme, les représentations égocentriques et allocentriques lors des processus d'encodage, de mise à jour spatiale, d'imagerie mentale ou de planification. Ce modèle, prenant en compte les données lésionnelles chez l'homme et l'animal, les données électro-physiologiques et les données en provenance de la psychologie cognitive, est basé sur l'architecture globale suivante (Fig. 32):

-La région pariétale, maintenant une carte de l'espace centrée sur l'orientation de la tête (égocentrique, crânio-topique⁶) peut être alimentée par des entrées sensorielles essentiellement visuelles (bottom-up) ou des entrées provenant de la mémoire à long terme (top-down). Une transformation des entrées visuelles, initialement rétinotopiques, en représentation crâniotopique est nécessaire. La manipulation d'informations spatiales pour la planification, la navigation et la mise à jour spatiale solliciterait essentiellement le cortex pariétal.

⁶ Représentation égocentrique et dont le référentiel est le crâne (Andersen, Snyder, Bradley, & Xing (1997).

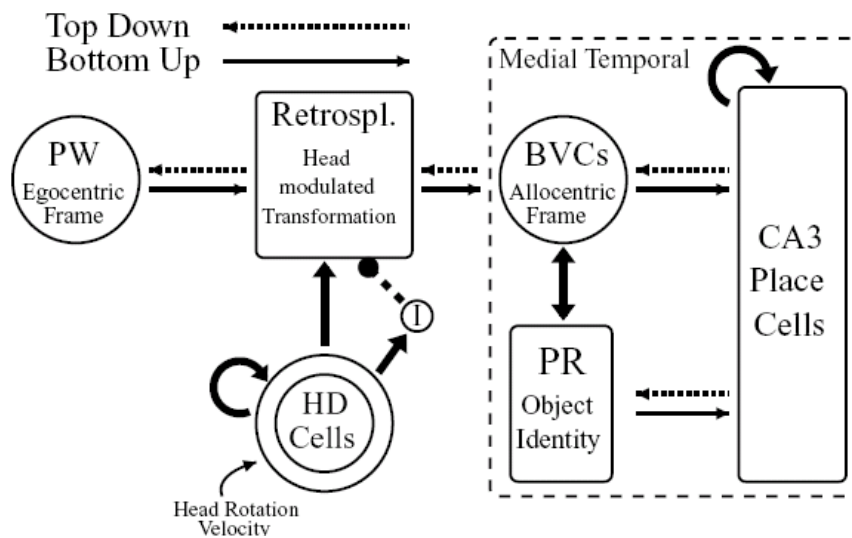


Figure 32 : Modèle schématique d'interaction temporo-pariétale impliqués dans la mémoire spatiale et l'imagerie mentale. PW: « Parietal Window » (fenêtre pariétale), servant à la perception et l'imagerie ; Retrospl. : Retrosplénial, sillon pariéto-occipital, aire 7a ; médian la translation entre les représentations égocentriques-allocentriques ; BVCs : « Boundary Vector Cells » parahippocampiques ; PR ; cortex périrhinal, encodant l'identité visuelle des repères ; CA3 place cells : cellule de lieu de l'hippocampe (Byrne et al., 2007).

-Le lobe temporal médian coderait les représentations spatiales allocentriques (indépendamment de la position et de l'orientation du sujet dans l'espace). Les représentations spatiales allocentriques seraient construites par les « Boundary Vector Cells » du gyrus parahippocampique et projetteraient vers les cellules de lieu hippocampiques.

-Un circuit de transformation permettrait la translation des informations entre la région pariétale « égocentrique » et les représentations spatiales à long terme « allocentriques ». Ce circuit peut opérer dans les deux sens : les informations égocentriques pariétales sont transformées en représentations allocentriques lors de l'encodage et les informations spatiales à long terme (allocentriques) sont transformées en représentations égocentriques lors de la récupération (imagerie mentale). La transformation « égocentrique » vers « allocentrique » serait opérée par une combinaison d'informations en provenance du signal de direction de la tête et d'entrées sensorielles égocentriques en provenance du cortex pariétal. La transformation inverse peut se produire, par exemple, lorsque des indices incomplets de référence égocentriques (sensoriels ou générés mentalement), par ce circuit de transformation, réactivent la représentation spatiale allocentrique correcte de l'environnement réel ou imaginé. Ces transformations seraient opérées par le cortex retrosplénial et le sillon intra-pariétal. D'autres structures ont été associées au modèle, notamment le cortex préfrontal, à l'origine des copies efférentes motrices, permettant l'exploration mentale de l'espace et la mise à jour spatiale durant la navigation.

Le signal de direction de la tête (« Head direction signal », en anglais) serait généré par l'intégration des informations sensorimotrices (*Intégration de trajet*) réalisée par un réseau de structures contenant des « cellules de direction de la tête ». Ce réseau serait constitué d'un ensemble large de structures, composé principalement du cortex retrosplénial, du postsubiculum, des noyaux antéro-dorsal et dorso-latéral du thalamus, du corps mamillaire latéral, et du cortex entorhinal dorso-caudal médian (pour revue voir Taube, 1998 ; 2007). On peut noter également le rôle d'une autre population de cellules, les « Grid cells », principalement dans le cortex entorhinal, qui participeraient comme les cellules de direction de la tête, à l'intégration de trajet (Taube, 1998 ; 2007). L'architecture de ce réseau et le rôle respectif de ces différentes structures semblent avoir été confirmé expérimentalement par une étude récente en IRMf (Lambrey, Doeller, Berthoz, & Burgess, 2012).

Spiers & Maguire (2007) proposent, de plus, que le cortex préfrontal joue un rôle dans le calcul de la proximité du but, la planification et le contrôle nécessaire à la navigation, ainsi que le maintien du but en mémoire de travail (voir aussi Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003; Maguire,

Burgess, Donnett, Frackowiak, Frith, & O'Keefe, 1998 ; Spiers, 2008) et le contrôle de l'atteinte du but ou le changement flexible de stratégie de navigation (pour revue voir, Humphries & Prescott, 2010). L'étude plus récente de Latini-Corazzini, Nesa, Ceccaldi, Guedj, Thinus-Blanc et al. (2010) a utilisé le même environnement et le même type d'apprentissage à partir d'une navigation dans un EV pour étudier les corrélats neuro-anatomique de l'acquisition des représentations de type « *Route* » et « *Survey* ». Ils ont observé que les tâches nécessitant les représentations de type « *Route* » et « *Survey* » activaient un réseau commun, incluant le précuneus, les cortex cingulaire postérieur, pariétal et parahippocampique, alors que la plupart des études précédentes avaient montré un rôle de ces structures dans les représentations de type « *Survey* ». De plus, ils ont montré que les structures comme l'aire motrice supplémentaire, l'insula et le noyau caudé, associées à l'apprentissage de routes n'ont pas été activées durant les tâches de type « *Survey* ». Ils ont de plus analysé les connectivités (corrélation entre activations) durant les deux type de tâches (« *Route* » et « *Survey* ») entre différentes structures : l'hippocampe, les gyrus parahippocampiques, cingulaires postérieurs droit et gauche et le cortex pariétal droit. Le lobe pariétal supérieur droit, le gyrus cingulaire postérieur droit, le gyrus parahippocampique gauche et le lobe pariétal postérieur droit présentaient de plus forte connectivité pendant les tâches de type « *route* » que les tâches de type « *Survey* ». Ce dernier résultat pourrait être expliqué par l'activation d'autres structures durant les tâches de type « *survey* », non prises en compte dans leur analyse des connectivités cérébrales.

On peut noter que le rôle spécifique de l'hippocampe dans les phases d'encodage, de stockage, de récupération, en fonction des référentiels spatiaux et des intervalles de rétention est toujours en débat à l'heure actuelle (Gomez, 2011 ; Teng & Squire, 1999 ; Moscovitch et al., 2005).

Le striatum, plus précisément le noyau caudé, a été associé aux stratégies de navigation mettant en jeu la mémoire procédurale, des représentations de type « *route* » (également appelées stratégies de navigation « *égocentriques* » ; Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003 ; Iaria, Petrides, Dagher, Pike, & Bohbot, 2003). Le rôle plus général des ganglions de la base (plus précisément du noyau accumbens) et du système dopaminergique dans l'apprentissage et la sélection de comportements flexibles permet également d'envisager leur rôle dans la navigation spatiale en relation avec le cortex préfrontal et le lobe temporal médian (pour revue, voir Humphries & Prescott, 2010).

II.9. Conclusion

Il ressort de cette partie que la navigation et l'apprentissage dans des grands espaces sont des activités complexes, nécessitant le développement de différents niveaux de représentations spatiales, la récupération de ces informations en mémoire à long terme afin de planifier des trajets, et la sélection de stratégies de navigation appropriée. La navigation nécessite également de contrôler sa progression et de mettre à jour sa position durant ses déplacements et d'effectuer des opérations (exécutives et visuo-spatiales) permettant cette mise à jour (pour revue voir Allen, 1999 ; Bakker, 2001 ; Wolbers & Hegarty, 2010).

Il apparaît donc que la navigation et l'apprentissage à l'échelle environnementale sont dépendantes à la fois des fonctions visuo-spatiales (à petite échelle), exécutives (attention, différentes composantes de la mémoire de travail, planification,...), mnésiques, ainsi que de l'intégration des informations sensorimotrices nécessaires à la fois pour les phases d'apprentissage et pour les phases de mise à jour spatiale durant la navigation.

Chapitre III : Applications de la Réalité virtuelle dans le domaine d'étude de la cognition spatiale et du vieillissement cognitif

Résumé : L'étude de la cognition spatiale à grande échelle et son déclin avec l'âge connaît un développement important ces dernières années, avec l'introduction des technologies de la Réalité Virtuelle (RV), permettant de simuler des activités de navigation dans des environnements écologiques. Ce chapitre traite des applications de la RV dans l'étude des effets du vieillissement sur la cognition spatiale et des applications et des avancées récentes obtenues. Il correspond à une partie d'un article soumis dans la revue « l'Année psychologique » et ne portera que sur le vieillissement normal.

III.1. Réalité virtuelle et Cognition Spatiale

III.1.a. Définitions de la réalité virtuelle

Plusieurs définitions de la réalité virtuelle ont été données. La première, fonctionnelle, stipule que « *La réalité virtuelle va [lui] permettre de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et (ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.* » (Fuchs, 1995 ; *Traité de la Réalité virtuelle, Tome 1, p. 7*). La seconde, plus technique, repose principalement sur deux notions, l'interaction et l'immersion : « *La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique (1) et des interfaces comportementales (2) en vue de simuler dans un monde virtuel (3) le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel (4) entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle (5) par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* » (Arnaldi et al., 2003 ; *Traité de la Réalité Virtuelle, p. 8*). Sa finalité serait « *de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel* » (Fuchs, 1996). Ces définitions nécessitent qu'un certain nombre de critères soient respectés : une simulation dynamique (objets personnes virtuelles..., animées en temps réel), une interface comportementale (interfaces sensorielles, motrices et sensori-motrices), un monde virtuel (simulant certains aspects de la réalité ou basé sur un monde symbolique, permettant d'« améliorer la compréhension du monde simulé »), une interaction en temps réel et un utilisateur en « immersion pseudo-naturelle » (dépendante du dispositif utilisé ; *Traité de la réalité Virtuelle, Tome 1, p. 8*).

III.1.b. Applications

Les applications de la réalité sont très nombreuses et dans différents domaines (*Traité de la Réalité Virtuelle, Tome 4, p. 19*) : sciences (simulation phénomènes physiques et chimie...), environnement (prévention risques naturels ou industriels), industries (création maquettes numériques...), architecture et urbanisme (plans et maquettes numériques), transports (simulateur de conduite), culture, art, loisir (jeux vidéos), défense (simulateurs de vol), médecine (acquisition des données des scanners et IRM ; simulation des organes du corps humains, préparation d'intervention chirurgicales). Le domaine qui nous intéressera pour cette thèse concerne la psychologie et les neurosciences (pour revue, voir aussi Klinger, 2006), pour lesquels on peut distinguer différentes applications : la psychothérapie et la rééducation d'une part (*Traité de la RV, Tome 4, p. 128*) et l'évaluation des troubles cognitifs et du handicap en neuropsychologie d'autre part (Rizzo, 1997).

Environnements plus écologiques	Minimise l'aspect « artificiel » de la situation
Contrôle et paramétrage des stimuli et des répo:	Feedback sur la performance
« Sécurité » de la situation	Enregistrement des comportements et des performances
Généralisation des apprentissages	Permet l'étude de situations à risques
	Adaptation des environnements aux utilisateurs
	Adaptation des présentations et des interfaces aux contraintes cognitives
	handicaps
	Gestion du déroulement en termes de pauses, discussion, consignes, explication
	Rigueur des situations d'expérimentation
Standardisation des protocoles	Introduction d'un aspect ludique
Optimisation de l'implication des utilisateurs	Permet d'introduire une aide et une gestion directe des erreurs

Tableau 10: Avantages de la réalité virtuelle dans la rééducation cognitive (d'après Schultheis et Rizzo, 2001).

Concernant l'évaluation des troubles cognitifs, différents domaines de la cognition humaine ont été abordés grâce à la réalité virtuelle, que ce soit la mémoire épisodique, les fonctions exécutives, l'attention (Schultheis, Himelstein, & Rizzo, 2002) ou encore la cognition spatiale (Waller, Bachmann, Hodgson & Beall, 2007; Loomis, 1999).

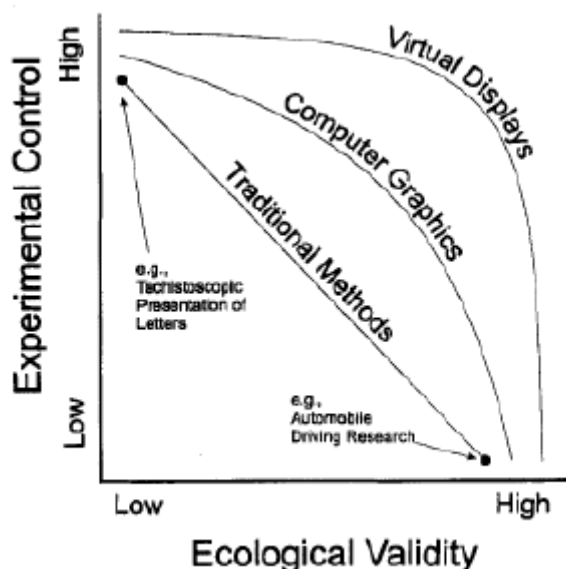


Figure 33: Relation entre validité écologique et contrôle expérimental pour les méthodes traditionnelles (outils classiques de type papier-crayon, les informatisés et les dispositifs virtuels (Loomis et al., 1999).

En effet, la réalité virtuelle a permis de résoudre différentes contraintes et désavantages des outils classiques comme leur manque de validité écologique ou le manque d'implication des utilisateurs, et ceux des évaluations réelles comme leur manque de contrôle expérimental, quelque soit le domaine de la cognition étudié (Loomis et al., 1999 ; Fig. 33).

III.1.c. Avantages de la RV dans le domaine de la Cognition Spatiale

La RV permettrait de répondre aux limites des évaluations classiques (manque d'interactivité et d'aspect dynamiques, ...) tout en permettant un contrôle expérimental rigoureux, particulièrement dans le domaine de la cognition spatiale (Tableau 10). La distinction entre cognition spatiale à petite et grande échelle repose en partie sur les différences de processus impliqués entre les tests de manipulation mentale d'objets (Rotation

mentale, Hidden Figures, Guilford Zimmermann...) où le sujet est statique d'une part et les tests de mémorisation ou de navigation dans des grands espaces, où le sujet se déplace dans un environnement. Cette distinction repose en grande partie sur l'absence de mise en jeu des informations sensorimotrices dans les tests visuospatiaux à petite échelle (de manipulation mentale d'objet), alors que celles-ci semblent jouer un rôle important dans les performances d'apprentissage et de navigation dans les grands espaces (Hegarty et al., 2006 ; Chrastil & Warren, 2012). Ceci conduit à la faible corrélation entre les tests Visuo-spatiaux (VS) de type « papier-crayon » et les performances d'apprentissage dans les grands espaces (Hegarty & Waller, 2005 : Tableau 7). La RV en simulant une locomotion (avancer, reculer, aller à droite, à gauche, tourner sur soi) dans de grands espaces réalistes (quartier, maison, hôpital, supermarché, ...) en 3 dimensions offre une nouvelle voie d'investigation de la cognition spatiale assurant des conditions d'étude à la fois réalistes, contrôlées et sécurisées pour la personne (Loomis, Blascovich & Beall, 1999; Wilson, 1997). Les applications dans ce domaine de la cognition spatiale sont également très diverses comme l'évaluation des capacités d'apprentissages et des stratégies de navigation en situations écologiques, l'étude des composantes de l'intégration de trajet et du rôle des informations sensorimotrices dans la cognition spatiale ou le couplage entre imagerie cérébrale et navigation dans un EV

III.1.d. Avancées récentes obtenues grâce à la Réalité Virtuelle

Le développement des technologies de la Réalité virtuelle a permis de nombreuses avancées dans le domaine de la cognition spatiale. Cette partie ne traitera que les applications dans le domaine de l'étude des mécanismes associés à l'apprentissage et la navigation dans les grands espaces.

III.1.d.1. « Wayfinding » et stratégies de navigation

A côté des travaux portant sur l'acquisition de connaissances spatiales et le rôle des activités sensorimotrices, d'autres s'intéressent à leur utilisation pour l'adaptation des comportements de navigation. Ils s'inscrivent plutôt dans les modèles de navigation adressant ce qui est appelé en anglais « *Wayfinding* » (Passini, Rainville, Marchand, & Joanne, 1995; Montello, 2005 ; Wiener, et al., 2009 ; Wiener & Mallot, 2003 ; Spiers & Maguire, 2008). Dans ces modèles, la navigation consisterait à planifier et exécuter un trajet d'une position à une autre, en utilisant les connaissances acquises de l'environnement (de type route ou/et « survey ») (Allen, 1999 ; Bakker, 2001 ; Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener et al., 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Différentes stratégies de navigation ont été définies, en fonction de la nature de l'environnement (intérieur, extérieur), du niveau de connaissance de l'environnement, des indices présents ... (pour revue, voir : Allen, 1999 ; Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener et al., 2009). Elles sont considérées comme dépendantes du fonctionnement exécutif, avec notamment l'intervention des mécanismes de planification et de résolution de problème (Passini, Rainville, Marchand & Joanne, 1995), mais aussi dépendantes du fonctionnement mnésique (Allen, 1999; Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener, et al., 2009 ; Wiener & Mallot, 2003 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Les études récentes utilisant la RV ont confronté les performances de navigation à une analyse de rapports verbaux de participants navigant dans un grand espace mettant alors à jour des comportements supplémentaires (eg., recherche d'indices, attente et confirmation de la bonne trajectoire, re-planification) par rapport aux modèles anciens (reposant sur la planification puis l'exécution de trajets), ainsi que leur séquence d'apparition durant la navigation (Hölscher, Meilinger, Vrachliotis, Brösamle & Knauff, 2006 ; Hölscher, Büchner, Meilinger & Strube, 2009; Spiers & Maguire, 2008). A titre d'exemple, l'utilisation de la stratégie de navigation appelée « *fine-to-coarse* » (*en*

français « *précis puis grossier* ») a été définie comme la plus efficace ; elle consiste à prendre en compte la régionalisation de l'environnement et à planifier le trajet de manière précise dans la région occupée et de manière plus grossière vers les régions voisines. Il a ainsi été montré que la stratégie de navigation utilisée est plus dépendante de la familiarité des navigants avec l'environnement, de la structure de ce dernier et des demandes de la tâche que de préférences individuelles.

III.1.d.2. Etude des différentes composantes des apprentissages spatiaux « Actif vs Passif » et de l'intégration de trajet

Le rôle des apprentissages « Actif vs Passif » dans la Cognition spatiale a fait l'objet de très nombreuses études utilisant la Réalité virtuelle (pour revue, voir Chrastil & Warren, 2012). La diversité des interfaces (écran, visuo-casques) et des interacteurs (manettes, tapis roulant, ...) ont permis l'étude du rôle spécifique des différentes composantes sensorimotrices (Flux optique, copies efférentes motrices, informations proprioceptives et vestibulaires). Les conclusions de ces études sont synthétisées dans la partie « Locomotion, Apprentissages « Actif/Passif » et Cognition spatiale » du chapitre 2.

III.2. Applications et données à partir de la Réalité virtuelle dans le domaine de la Cognition spatiale et du vieillissement

Introduction

Dans cette partie, nous allons aborder les applications et les données récentes obtenues grâce à la réalité virtuelle dans la cognition spatiale à petite échelle et dans les différents domaines de la cognition spatiale à grande échelle. Les effets du vieillissement sur les différentes fonctions et aptitudes seront abordés, ainsi que les avancées récentes obtenues grâce aux applications développées.

III.2.a. Cognition spatiale à petite échelle

Un déclin lié à l'âge est observé avec les évaluations classiques, quelle que soit l'aptitude visuospatiale considérée: rotation mentale (De Béni, Pazzaglia & Gardini, 2006 ; Dollinger, 1995), prise de perspective mentale (Herman & Coyne, 1980; Inagaki, Meguro, Shimada, Ishizaki, Okuzumi & Yamadori, 2002), et d'autres tests évaluant différents composants visuo-spatiaux (Hegarty & Waller, 2005) comme le *Block design*, *Embedded Figures*, *Hidden Figures*, *Card Rotation* par exemple (pour revue, voir Cronin-Golomb & Amick, 2001 ; Salthouse, 1992). Les applications en RV dans ce domaine sont très peu nombreuses chez la personne âgée. Néanmoins, la validité et l'utilité de la version virtuelle du Rod-and-Frame Test (évaluant la dépendance au champ visuel, ou plus précisément la perception subjective de la verticalité) a été démontrée en termes de meilleur contrôle de l'environnement et des stimuli, de meilleure précision des mesures des comportements et de meilleure validité écologique via l'utilisation de stimuli dynamiques en 3D (Reger et al., 2003). McGee et al. (2000) ont développé un ensemble de tests en RV dont un test de manipulation et de rotation manuelle de figures 3D, utilisant les mêmes figures que le test de rotation mentale de Shepard & Metzler (1971). Ils montrent qu'un entraînement améliore les performances à la tâche de rotation manuelle chez les personnes âgées, montrant la possibilité d'utiliser des applications en RV pour l'entraînement des fonctions visuo-spatiales à petite échelle. Le Money Road Map Test (MRMT, Money, Alexander, & Walker, 1965), qui est un test de rotation mentale, a également été adapté en RV (Morganti, Marrakchi, Urban,

Iannocari, & Riva, 2009). Une corrélation entre l'âge des sujets et les performances à ce test a été observée, répliquant celle obtenue avec la version 2D du test (Armstrong & Cloud, 1998). Bien qu'encore peu nombreuses, les répliques RV des tests visuo-spatiaux à petite échelle chez la personne âgée, reproduisent avec succès les effets de l'âge observés avec les tests de type « papier-crayon » conférant ainsi aux applications RV une bonne validité de construit. A cela, s'ajoutent des applications RV permettant d'explorer des mécanismes sensibles aux vieillissements mais dont l'accès était limité par les méthodes psychométriques conventionnelles. A titre d'exemple, l'application de Messier, Adamovich, Jack, Hening, Sage & Poizner (2007) évalue les capacités d'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice à l'aide d'une tâche nécessitant d'atteindre la position d'une balle dans un espace virtuel, alors qu'une distorsion entre la position de la main et celle obtenue dans l'EV est introduite. Celle-ci forçait les sujets à compenser cette distorsion et à apprendre une nouvelle coordination visuo-motrice pour atteindre la position de cette balle dans l'espace virtuel. Dans une autre phase, une distorsion inverse par rapport à la précédente était imposée, forçant l'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice, inverse de la précédente. Les personnes âgées ont montré des difficultés dans la phase d'apprentissage de la première coordination visuo-motrice par rapport aux jeunes, mais une amélioration des performances avec les essais lors de l'apprentissage inverse, identique aux jeunes. Cette étude révèle l'intérêt de la RV pour l'étude du contrôle visuo-moteur et de l'adaptation aux changements environnementaux, notamment grâce à la manipulation de la position des stimuli dans un espace en 3D.

Ces premiers résultats sont encourageants en termes d'avancées possibles dans la compréhension du déclin et des possibilités d'entraînement des aptitudes spatiales à petite échelle. Néanmoins, les futures études devront également renseigner les différences liés au sexe, qui sont largement documentées dans les études portant sur les évaluations papier-crayon (Linn & Petersen, 1985 ; Parsons et al., 2004 ; Voyer, Voyer & Bryden, 1995), et qui aujourd'hui, ne sont que modestement explorées dans les études sur le vieillissement.

III.2.b. Cognition spatiale dans des grands espaces

Un effet du vieillissement est largement rapporté (eg., Newman, & Kaszniak, 2000; pour revue, Moffat, 2009) et s'accompagne de plaintes subjectives des personnes âgées relatives à leurs difficultés de navigation et d'orientation spatiale au quotidien (Burns, 1999). Ce déclin des capacités de navigation est aujourd'hui considéré comme étant d'origine multifactorielle (pour revue, Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010), avec notamment des difficultés de construction de représentation spatiales associée au déclin du fonctionnement de l'hippocampe (Rosenzweig, & Barnes, 2003), et/ou des défauts d'intégration des informations liées aux mouvements (Allen, Kirasic, Rashotte, & Haun, 2004) et/ou encore de la planification et de l'ordonnancement temporel des différentes séquences composant un trajet (associé au fonctionnement fronto-exécutif, Salthouse, 2003 ; Moffat, 2009 ; West, 1996 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Dans ce contexte multifactoriel, les études en RV ont porté sur quatre domaines: la mémoire spatiale dans des applications réalistes, les stratégies de navigation (en particulier égocentriques vs. allocentriques), l'intégration de trajet et son rôle dans la mémoire spatiale et enfin l'étude des corrélats neuro-fonctionnels du vieillissement de la cognition spatiale dans les grands espaces.

III.2.b.1. Mémoire spatiale dans des applications réalistes

Concernant le développement des connaissances spatiales dans des grands espaces, et en référence au modèle Landmark, Route, Survey (L-R-S) de Siegel et White (1975), un déclin

dans des tâches de rappel libre ou de reconnaissances de repères (connaissances de type « Landmark ») après navigation dans un EV a été observé (Cushman, Stein, & Duffy, 2008 ; Head & Isom, 2010 ; Jansen, Schmelter, & Heil, 2010 ; Liu, Levy, Barton & Iaria, 2011), confirmant les données obtenues dans des évaluations en conditions réelles (Bruce & Herman, 1983 ; Kirasic, 1991; Lipman, 1991 ; Monacelli, Cushman, Kavcic, & Duffy, 2003). Un déclin des performances dans des tâches évaluant les connaissances de type « route » a été rapporté, dans des tests en laboratoire à l'aide de séries de photos (Lipman, 1991; Lipman & Caplan, 1992) ou lors de navigation dans des situations réelles (Barrash, 1994 ; Monacelli et al., 2003 ; Wilkniss et al., 1997 ; Taillade et al., 2012). Ce déclin a été reproduit dans des EV réalistes (hôpital virtuel : Cushman et al., 2008 ; Fig. 34 ; maisons virtuelles : Meulenbroek, Petersson, Voermans, Weber, & Fernández, 2004 ; villes virtuelles : Head et Isom, 2010 ; Iaria, Palermo, Committeri, & Barton, 2009 ; Liu et al., 2011 ; Plancher, Nicolas, & Piolino, 2008 ; Plancher, Gyselinck, Nicolas, & Piolino, 2010; Zakzanis, Quintin, Graham, & Mraz, 2009). De la même manière, l'acquisition de représentations spatiales de type « survey » a aussi fait l'objet d'études en RV (environnements virtuels de type labyrinthe composés de couloirs: Jansen et al., 2010; Head et Isom, 2010 ; Moffat et al., 2006; « building » virtuels; Foreman, Stanton-Fraser, Wilson, Duffy & Parnell, 2005; Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger & Lindenberger, 2005; Sjölander, Hoök, Nilsson & Andersson, 2005; Cushman et al., 2008 ; quartiers virtuels : Iaria et al., 2009; Liu et al., 2011), qui rapportent toutes un déclin des performances lié au vieillissement, comme cela avait été observé en conditions réelles (Kirasic, 1991, 2000; Simon, Walsh, Regnier, & Krauss, 1992).

A ce niveau d'analyse, les études en conditions réelles et en RV indiquent que le vieillissement cognitif affecte surtout les deux derniers niveaux d'acquisition de représentations spatiales définies par le modèle de Siegel & White (1975). On peut noter quelques études utilisant des tâches de navigation dans des EV à l'aide d'une carte apprise ou disponible pendant la navigation, inspirées par le Money-Road-Map test (Money, 1965) ou le sous test « Wisc-R Maze » (Wechsler, 1976), développés pour mesurer la désorientation topographique (Morganti, Marrakchi, Urban, Iannocari & Riva, 2009 ; Carelli, Rusconi, Scarabelli, Stampatori, Mattioli & Riva, 2011). Ces tâches semblent toutefois peu spécifiques et pourraient impliquer à la fois la mémoire de route, les capacités de prise de perspective mentale ou de rotation mentale. N'ayant pas été comparées directement avec des tâches de navigation ou d'apprentissage en condition réelle, ces études ne permettent pas, pour le moment, de conclure sur la validité de ces outils dans l'évaluation de la désorientation topographique. Les seules études comparant directement les performances d'apprentissage et de navigation entre des environnements réels et leurs équivalents virtuels ont permis de montrer des performances équivalentes entre ces deux situations d'apprentissage, quel que soit le niveau de représentation testé (Cushman et al., 2008)

L'ensemble de ces résultats permis par l'utilisation de la RV confirme les résultats obtenus en conditions réelles, montrant des difficultés d'apprentissage touchant les deux niveaux de représentations de l'espace (Route et Survey), quelle que soit la taille des environnements. Ces conclusions favorisent ainsi l'utilisation d'applications réalistes en RV pour l'évaluation écologique des difficultés de navigation chez ces personnes. Ces résultats restent toutefois à confirmer, les études comparant directement les apprentissages dans des EV et des équivalents réels restant peu nombreuses chez la personne âgée.



C Scenes from virtual environment



Figure 34 : Hôpital virtuel utilisé par Cushman et al., 2008

III.2.b.2. Stratégies de navigation

Deux approches se distinguent dans ce domaine : une première utilisant des répliques virtuelles de labyrinthes (issues des travaux chez l'animal) et une seconde utilisant des applications plus réalistes.

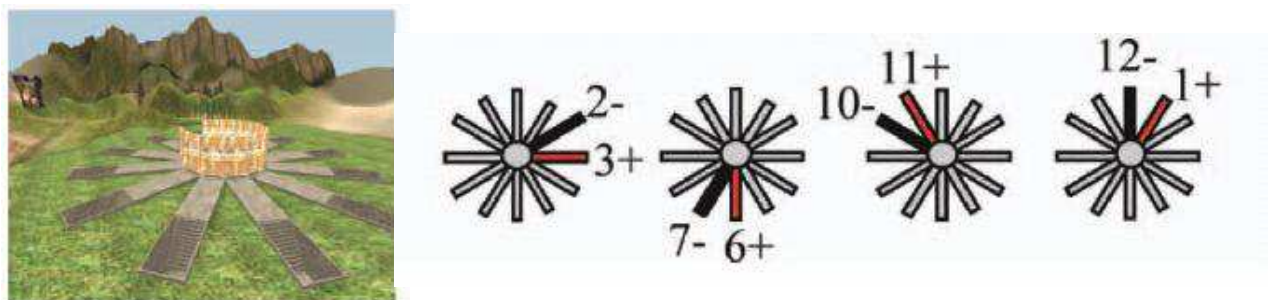


Figure 35 : Exemple de version virtuelle d'un labyrinthe radiaire utilisé par Etchamendy et al., 2011)

Des versions virtuelles de la piscine de Morris⁷ (Antonova, Parslow, Brammer, Dawson, Jackson & Morris, 2009 ; Driscoll et al., 2003; Driscoll, Hamilton, Yeo, Brooks & Sutherland, 2005; Laurance, Thomas, Newman, Kaszniak, Nadel & Jacobs, 2002; Moffat et al., 2007; Moffat & Resnick, 2002; Schoenfeld, Lehmann & Leplow, 2010; Thomas, Laurance, Luczak & Jacobs, 1999), adaptée à l'humain, ont permis de reproduire le déclin observé dans sa version réelle (Newman & Kaszniak, 2000), suggérant des difficultés chez les personnes âgées pour développer et utiliser des représentations spatiales allocentriques. Deux applications récentes, utilisant des répliques virtuelles de labyrinthes, ont étudié l'effet de l'âge sur les stratégies de navigation (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto & Bohbot, 2011 ; Rodgers, Sindone & Moffat, 2012). La première a utilisé une version virtuelle d'un

⁷La piscine de Morris est un labyrinthe classiquement utilisé chez le rat pour l'étude la mémoire spatiale. Elle consiste en une piscine circulaire remplie d'un liquide opaque dans laquelle l'animal doit trouver une plateforme cachée sous le liquide, en utilisant des indices externes présents dans l'arène, permet d'évaluer les stratégies de navigation dites « égocentrique » ou procédurale et « allocentriques » (Morris, Garrud, Rawlins, & O'Keefe, 1982).

labyrinthe radiaire à 12 bras (Fig. 34), avec une première phase d'apprentissage d'associations de paires de stimuli (vues simultanée de deux bras) et de réponses (de type « procédurale », nécessitant de récupérer un objet dans un des bras). La seconde phase nécessitait une utilisation flexible de ces associations, dans laquelle les paires de stimuli étaient réarrangées (évaluant la mémoire « associative » que les auteurs ont associée à l'utilisation d'une « carte cognitive »). Leurs résultats concluent à une utilisation préférentielle d'une stratégie de navigation « égocentrique » (ou « procédurale ») associée à un déficit des apprentissages associatifs (ou mettant en jeu l'utilisation d'une « carte cognitive ») chez les personnes âgées. La deuxième étude, à l'aide d'un labyrinthe en Y, montre elle aussi une préférence des personnes âgées pour les stratégies de navigation dites « égocentriques » (ou procédurale), comparé aux jeunes utilisant à la fois les stratégies « égocentriques » et « allocentriques ». Cette préférence des âgés pour les stratégies de navigation de type « procédurale » peut toutefois paraître contradictoire à la lumière d'autres travaux montrant des difficultés pour la mémoire de route, et notamment sur la base de labyrinthes virtuels de plus grande taille (Head et Isom, 2010; Jansen et al., 2010 ; Kalia, Legge & Giudice, 2008 ; Moffat et al., 2001 ; Sayers, 2004).

III.2.b.3. Vieillessement cognitif, navigation et déclin exécutif

La navigation dans des grands espaces au quotidien est une activité complexe, nécessitant de planifier des trajets, de contrôler sa navigation et de mettre à jour sa position durant la navigation (Allen, 1999 ; Wiener et al., 2009 ; Wolbers et Hegarty, 2010). Certains auteurs ont donc suggéré un rôle du déclin exécutif (Braver & West, 2008 ; Salthouse, Atkinson & Berish, 2003 ; West, 1996) dans les difficultés de navigation chez les personnes âgées, en plus des déclin mnésique, visuo-spatiaux ou d'intégration des informations relatives aux mouvements (Kirasic, 2000 ; Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Peu d'études ont exploré directement cette hypothèse pour le moment. Néanmoins, deux études en RV suggèrent un rôle du déclin exécutif en démontrant qu'à connaissances spatiales égalisées, les différences jeunes-âgés s'expriment toujours lorsqu'il s'agit d'utiliser ses connaissances pour planifier et exécuter un trajet. En effet, dans l'étude réalisée par Iaria et al. (2009), les participants exploraient librement un quartier virtuel en plusieurs séances, avec pour instruction de mémoriser six points de repère. Une fois que les tests évaluant leurs connaissances du quartier (tâche de placement des repères sur une carte) atteignaient le score maximum, les participants réalisaient la tâche de type « Wayfinding », où ils devaient atteindre les différentes positions apprises. Leurs résultats ont montré une diminution de la vitesse d'apprentissage de la topographie de l'environnement ainsi que de l'efficacité pour atteindre ces points de repère, suggérant des difficultés à la fois pour l'acquisition de connaissances spatiales (associé au fonctionnement mnésique) et pour leur utilisation pour naviguer dans un environnement (voir aussi Liu et al., 2011; pour une étude similaire de la même équipe). Foreman et al. (2005) ont étudié les capacités de personnes âgées à naviguer dans un centre commercial virtuel, dans une tâche de transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel (après quatre séances d'apprentissage de la topographie du centre commercial virtuel). Et, malgré des connaissances spatiales équivalentes aux jeunes, les personnes âgées avaient des difficultés pour naviguer dans l'environnement réel, suggérant ainsi des difficultés d'utilisation des connaissances pour planifier et exécuter le trajet. On peut également rapprocher les résultats d'Etchamendy et al. (2011) vus précédemment et qui montraient que les âgés ayant les meilleures performances dans la partie « flexible » de leur labyrinthe radiaire à 12 bras étaient également ceux ayant de meilleures performances sur une autre tâche de navigation réalisée dans une ville virtuelle. Enfin, dans notre étude (Taillade et al.,

2012), nous avons retrouvé une absence d'effet du vieillissement sur les connaissances spatiales acquise en RV contrastant avec un déclin des performances sur une la tâche de transfert des connaissances spatiales du virtuel au réel. Ce déclin était corrélé aux déclin mnésiques et exécutifs mesurés à l'aide d'une batterie de tests neuropsychologiques. Aussi, si les auto-estimations des difficultés spatiales en vie quotidienne⁸ chez les sujets jeunes étaient corrélées à leur performance de transfert de connaissances, ce n'était pas le cas pour les âgés qui surestimaient leur performances spatiales quotidiennes. Nos résultats étaient donc en faveur d'une origine à la fois mnésique et exécutive des difficultés de navigation liées à l'âge. De plus, l'appréciation de ces difficultés était sous-estimée par les participants âgés suggérant des difficultés métacognitives supplémentaires.

Ces premières études révèlent bien l'intérêt de disposer d'outils tels que ceux proposés par la RV, pour appréhender la complexité des effets du vieillissement sur les mécanismes en œuvre dans la navigation spatiale.

III.2.b.4. Cognition spatiale et corrélats neuro-anatomiques

Quelques études associant la RV à des techniques de neuro-imagerie fonctionnelle ont tenté d'éclaircir le rôle des déclin mnésiques (mémoire spatiale de type carte cognitive vs. procédurale) et des perturbations exécutives par l'étude des substrats anatomiques impliqués. Antonova et al. (2009) ont étudié la relation entre l'activation cérébrale (IRMf), des mesures du volume de régions cérébrales et des performances de navigation dans une version virtuelle de la Piscine de Morris. Une perte de volume dans le cortex préfrontal et le gyrus parahippocampique était rapportée chez leurs sujets âgés, mais pas dans l'hippocampe. Une activation d'un large réseau de structures a été notée avec des différences « jeunes - âgés » lors de l'encodage et la récupération dans la Piscine de Morris. Seuls les jeunes présentaient une activation de l'hippocampe (droit et gauche), du gyrus parahippocampique, du pôle frontal et du cortex préfrontal dorso-latéral droits durant l'encodage et du cortex préfrontal dorso-latéral droit durant la récupération. Les auteurs ont conclu à un déclin de la mémorisation des informations spatiales allocentriques, associée principalement à une diminution de l'activité de l'hippocampe lié au vieillissement, ainsi qu'à un dysfonctionnement préfrontal et parahippocampique. Moffat et al. (2006) ont utilisé un EV composé de plusieurs pièces, interconnectées par des couloirs et ont mesuré l'activation du cerveau pendant l'encodage de la configuration de l'EV. Chez les sujets jeunes, s'observaient des activations dans un large réseau de structures (hippocampe, gyrus parahippocampique, le cortex rétrosplénial, cortex pariétal bilatéral, lobe pariétal médial et le cervelet). Chez les âgés, l'activation était réduite dans l'hippocampe et le gyrus parahippocampique, le lobe pariétal et le cortex rétrosplénial médian. L'examen des relations entre les performances de navigation spatiale et les activations cérébrales a également montré des différences entre les jeunes et les âgés. L'activation du gyrus parahippocampique était liée aux performances dans les deux groupes, mais l'activation du gyrus frontal supérieur n'a été notée que pour le groupe des jeunes et l'activation du cuneus, gyrus occipital, inférieur, gyrus fusiforme et inférieur gyrus temporal seulement dans le groupe des plus âgés. Aussi, Meulenbroek et al. (2004) ont également analysé l'activation de structures cérébrales pendant l'encodage d'une route dans un EV et la réalisation d'une tâche nécessitant d'indiquer la direction prise à différents points de décision (connaissances de type « route »). Une faible différence entre les performances des adultes jeunes et âgés est obtenue pour la tâche de reconnaissance. Le déclin des performances dans le groupe des âgés était associé à une activation réduite du gyrus parahippocampique et à une réduction de la suppression de l'activité dans le cortex cingulaire

⁸ [Évalué avec l'échelle de Skelton et al., 2000).

antérieur pendant l'encodage. Une faible différence entre les activations cérébrales des sujets jeunes et âgés était également trouvée pendant la reconnaissance de route. De même, Etchamendy, et al. (2011) montraient également une relation positive entre les performances au test de mémoire « flexible » du labyrinthe radiaire et l'activation du cortex préfrontal dorso-latéral et de l'hippocampe, mais par contre une relation négative avec l'activation du noyau caudé. A cela, la préférence des personnes âgées pour la stratégie « procédurale » était associée à des activations du noyau caudé et non à des activations de l'hippocampe pour réaliser la tâche « wayfinding » (voir aussi Rodgers et al., 2012 ; pour une évaluation des stratégies de navigation dans un labyrinthe en Y).

Ainsi, les bases neurales du déclin des performances de navigation avec l'âge semblent principalement impliquer les cortex préfrontaux mais aussi les structures hippocampiques. Cette conclusion est confortée par les études utilisant des mesures neuro-volumétriques. Le déclin des connaissances de type « route » et « survey » s'associerait à la perte du volume d'un réseau de structures assez large (hippocampe, gyrus parahippocampique, noyau caudé) (Antonova et al., 2009 ; Head et Isom, 2010, Moffat et al., 2007). Head & Isom (2010) ont utilisé un labyrinthe virtuel pour comparer l'effet de l'âge sur des tâches de rappel de route (rappel d'une route apprise en trois fois) de type « wayfinding » (atteindre une position particulière après une exploration libre de l'environnement). Des tâches supplémentaires leur ont été administrées: rappel libre de repères, positionnement et identification de repères, reconnaissance de scènes. Ils ont observé des différences liées à l'âge pour les tests évaluant l'apprentissage de la configuration de l'environnement et pour les tâches de type « wayfinding » et rappel de « route ». Et, les performances aux tests de rappel de route étaient associées au volume du noyau caudé et celles pour les tâches de type « wayfinding » au volume de l'hippocampe, en accord avec les études chez les sujets jeunes (Hartley et al., 2003 ; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003). Contrairement à leurs attentes, ils n'ont pas trouvé de relation entre le volume du cortex préfrontal et les performances de navigation, que ce soit pour les tâches associées au rappel de route ou à la tâche de type « wayfinding ». Par contre, Moffat et al. (2007) rapportent, chez les âgés, des performances dans la piscine de Morris virtuelle corrélées, d'une part, à la perte volumétrique du cortex préfrontal et d'autre part, à l'augmentation des persévérations obtenues au Winconsin Card Sorting (Heaton, Chelune, Talley, Kay & Curtiss, 1993), suggérant également un rôle du déclin exécutif dans les performances de navigation, même dans des environnements relativement simples.

III.2.b.5. Intégration de trajet et activités sensorimotrices

Dans un test en laboratoire, Allen, Kirasic, Rashotte, & Haun (2004) rapportent un déficit pour l'intégration de trajet basée uniquement sur les informations translationnelles et rotationnelles d'origine vestibulaires (condition de déplacement en chaise roulante et les yeux fermés) mais pas pour la condition fournissant des informations vestibulaires et proprioceptives (en condition de marche avec les yeux fermés). Ainsi, les âgés présentent des difficultés à intégrer les mouvements translationnels et rotationnels, lorsqu'un seul type d'information est disponible (eg., vestibulaire) mais ont des performances préservées lorsque plusieurs source sont fournies (eg., vestibulaires et proprioceptives). Ces résultats suggèrent que leur déficit sensoriel (Dennis & Cabeza, 2008) peut être compensé lorsque différentes sources sensorielles sont sollicitées. Aucune étude en RV à ce jour n'a été réalisée sur le rôle respectif des informations proprioceptives et vestibulaires dans l'intégration de trajet chez la personne âgée. Par contre, trois études se sont intéressées aux effets du vieillissement sur l'intégration de trajet basée sur le flux optique. Schoenfeld et al. (2010) ont montré un effet négatif de l'âge sur l'intégration de trajet basée sur le flux optique, dans une tâche nécessitant de donner la direction de son point de départ après avoir effectué un trajet de deux ou trois

changements de direction dans une forêt virtuelle. Pour aller plus loin, Mahmood, Adamo, Briceno & Moffat (2009) ont analysé l'effet du vieillissement sur les deux composantes (rotation et mouvements linéaires) du flux optique et leur rôle respectif dans le déclin des performances d'intégration de trajet. Précisément, l'étude de la reproduction des mouvements linéaires a été réalisée dans un couloir virtuel sans indices visuels, avec une texture sur le sol et les parois. Les tâches de reproduction de la rotation seule et d'intégration de trajet (nécessitant d'intégrer les deux composantes), ont été réalisées dans une arène circulaire virtuelle, ne présentant également que des textures et pas d'indices visuels. Quand chacune des deux composantes était évaluée séparément, les personnes âgées présentaient des performances équivalentes à celles des jeunes. Par contre, lorsque les deux composantes devaient être intégrées, les personnes âgées avaient de moins bonnes performances. Ce résultat suggère un déficit d'intégration des composantes translationnelles et rotationnelles. Harris & Wolbers (2012) ont complété ce résultat en montrant que le déficit d'intégration avec l'âge augmentait avec l'augmentation des distances et des angles de rotation dans la tâche de complétion de triangle⁹, suggérant aussi des difficultés avec l'âge situées dans le traitement de chaque information (translationnelle ou rotationnelle) en amont de leur intégration.

Ces résultats en RV complètent les travaux d'Allen et al. (2004) en montrant qu'au sein d'une source sensorielle l'âge affecte l'intégration des informations translationnelles et rotationnelles, ce qui pourrait augmenter le pouvoir compensatoire d'une stimulation multi-sensorielle. Une telle hypothèse requière plus d'investigations en particulier à l'aide des applications virtuelles avec lesquelles il est possible, à la fois de manipuler les mouvements rotationnels et translationnels mais aussi les sources sensorielles (flux optique, vestibulaires, et proprioceptives). De telles investigations seront riches d'apports pour la compréhension des effets de l'âge sur les mécanismes d'intégration de trajet en termes à la fois de déclin d'intégration ou de compensation multi-sensorielle.

A un autre niveau, Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger & Lindenberger (2005) ont examiné l'impact du contrôle de l'équilibre sur les performances de navigation de la personne âgée. Les participants devaient apprendre la configuration et la position d'objets dans un musée virtuel, en marchant sur un tapis roulant. Une condition permettait aux participants de contrôler leur équilibre grâce à une barre et une autre nécessitait de contrôler leur équilibre sans cette aide. L'absence d'aide au maintien de l'équilibre durant la navigation dans l'EV a diminué les performances de mémoire spatiale et provoqué une augmentation des mouvements du tronc des personnes âgées. Cela suggère que le contrôle de l'équilibre, et au sens large le contrôle sensori-moteur durant la marche, requièrent des ressources en mémoire de travail ou un contrôle exécutif qui en retour affecte les performances des activités cognitives concourantes, dont le fonctionnement de la mémoire spatiale (voir aussi, Beauchet & Berrut, 2006 ; Dumas, Smoldes & Krampe, 2008 ; Li, Krampe & Bondar, 2005 ; Lindenberger, Marsike & Baltes, 2000 ; Neider, Gaspar, McCarley, Crowell, Kaczmariski & Kramer, 2011 ; Schellenbach, Lövdén, Verrel, Crowell, Kaczmariski & Kramer, 2010). Cette interprétation trouve également écho dans les résultats de l'étude de Plancher et al. (2012) qui, à l'aide d'une tâche virtuelle de navigation automobile en milieu urbain, rapportent que le déclin des performances de mémoire spatiale chez le sujet âgé est plus prononcé lorsqu'il est en position de conducteur (condition active) que de passager (condition passive) (à l'inverse du sujet jeune).

⁹ Tâche classiquement utilisées pour étudier l'intégration de trajet et nécessitant de retourner à son point de départ par le chemin le plus direct possible (voir partie « Intégration de trajet »).

III.3. Conclusion et Perspectives

A ce stade des investigations en RV, l'origine hippocampo-frontale du vieillissement de la cognition spatiale demeure pertinente, avec un déclin touchant principalement les capacités d'apprentissage et de mémoire spatiale, les mécanismes d'intégration des informations relatives aux mouvements du corps, les mécanismes de planification de trajet et de contrôle moteur de la navigation (Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Ces difficultés d'acquisition et d'utilisation des connaissances spatiales s'accompagneraient, chez les personnes âgées, d'une préférence pour les stratégies de navigation plus procédurales (dépendantes du noyau caudé). D'autres études doivent étayer cette conclusion et apporter plus de précisions afin de permettre une meilleure compréhension des effets du vieillissement sur les apprentissages et la navigation spatiale. Par exemple, les études utilisant le couplage RV-imagerie fonctionnelle encore peu nombreuses n'ont pas comparé les activations durant l'encodage, la récupération, la planification ou l'exécution du trajet, comparaisons qui sans doute éclaireront le rôle des structures impliquées dans les effets du vieillissement normal sur les différents processus impliqués dans la mémoire spatiale et la navigation. Aussi, le rôle des différentes composantes sensorimotrices (copies efférentes motrices, informations proprioceptives) sur le développement des connaissances spatiales (de type Repères, Route et Survey) doit être précisé chez les âgés. De même, l'interaction entre contrôle sensorimoteur et cognitif est pour le moment peu connue et pourrait s'inspirer des travaux sur la marche montrant que celle-ci place les personnes âgées en situation de tâches multiple (Baldwin, 2002) dans laquelle le contrôle sensori-moteur devient prioritaire sur la navigation (voir Lindenberger, Marsiske, & Baltes., 2000 ; pour une double-tâche de marche et de conversation). La RV par ses multiples interfaces sensori-motrices, offre un cadre d'étude privilégié pour appréhender les effets du vieillissement sur les relations entre sensori-motricité, mémoire spatiale et navigation (Chrastil & Warren, 2012).

D'autres attentes peuvent être formulées, notamment en termes de relation entre les performances en RV, et celles obtenues par des questionnaires d'auto-évaluations de sa performance. Des études dans ce domaine enrichiraient la compréhension des liens entre déclin des capacités navigationnelles et difficultés méta-cognitives des âgés (Taillade et al., 2012). Aussi, un incontournable sera dans les prochaines études la prise en compte de l'effet du sexe, dont l'influence sur les performances ou les stratégies d'apprentissage et de navigation en réel et en virtuel n'est plus à démontrer (eg., Montello, Lovelace, Golledge & Self, 1999 ; Castelli, Corazzini, Geminiani, 2008 ; Woolley et al., 2010) et, qui pourrait être modifié (atténué) par l'âge (Liu et al., 2011). Les perspectives d'investigations sont extrêmement nombreuses, les recherches ayant été retardées par la nécessité préalable d'adapter les dispositifs technologiques aux contraintes des utilisateurs âgés.

Une autre perspective essentielle aux travaux présentés sera l'inclusion d'une démarche de validation écologique des conclusions rendues par les études en RV. En effet, très peu d'études encore confrontent leurs résultats à des mesures en situations réelles. Enfin, une autre interrogation sera de comprendre pourquoi les troubles de l'orientation et de la navigation, quand ils sont présents chez la personne âgée, ne sont pas toujours en lien avec la plainte ou l'auto-estimation de la personne comme nous avons pu le montré dans notre étude (Taillade et al., 2012).

Chapitre IV : Problématiques, objectifs et méthodologie générale des travaux

IV.1. Problématiques et objectifs :

Comme nous avons pu le constater dans les parties précédentes, la navigation et l'apprentissage dans les grands espaces sont des activités complexes, dépendantes notamment des fonctions visuospatiales à petite échelle, des fonctions mnésiques, exécutives (planification, attention, mémoire de travail...), et des activités sensorimotrices.

Les études dans le domaine du vieillissement normal, ont permis de montrer un déclin touchant tous les niveaux d'acquisition de représentations spatiales (landmark, route ou survey), de l'intégration de trajet et de la navigation (Klencken al., 2012 ; Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Différents domaines restent toutefois à explorer. L'utilisation de la RV dans le domaine de la cognition spatiale a connu un développement important ces dernières années, y compris dans le champ du vieillissement. Nous avons pu remarquer que la vérification de la validité écologique des applications est rarement effectuée, et nous aborderont ce point dans notre thèse, en comparant directement les performances de navigation en réel et en virtuel. Ensuite, nous avons également vu que le rôle respectif des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation a été seulement suggéré (via notamment l'observation rapportée concernant les modifications des corrélats neuro-anatomiques, Moffat et al., 2007 ; Antonova et al., 2009) mais jamais directement démontrée par une analyse des corrélations entre mesures des performances de navigation et mesures neurocognitives. Seule une étude a été réalisée dans ce but mais uniquement dans une version virtuelle de la piscine de Morris assez éloignée des situations rencontrées au quotidien (Moffat et al., 2006). Enfin, le dernier point que nous aborderont concerne le rôle de l'activité sensorimotrice dans la navigation. En effet, les études sur ce sujet sont peu nombreuses dans le cas du vieillissement, malgré son effet largement démontré dans les études en RV sur les activités de navigation au quotidien (Chrastil & Warren, 2012).

IV.1.a. Etude la validité écologique de l'application en réalité virtuelle et corrélats cognitifs

La question de la validité écologique (c'est-à-dire de la relation avec les difficultés rencontrées au quotidien) des outils classiques utilisés en neuropsychologie se pose depuis quelques années et a été à l'origine du développement d'évaluation neuropsychologique à l'aide de la RV (Loomis et al., 1999 ; Rizzo et al., 2004), dans différents domaines (mémoire épisodique, fonctions exécutives,...). Concernant plus spécialement le domaine de la cognition spatiale, les faibles relations entre les tests visuospatiaux classiques (rotation mentale, Hidden Figure test...) et les performances d'apprentissage ou de navigation dans les grands espaces ont conduit à la dissociation entre cognition spatiale à petite échelle (manipulation mentale d'objets) et à grande échelle (apprentissage et navigation dans les grands espaces) (Hegarty & Waller, 2005 ; Hegarty et al., 2006). Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer cette validité écologique. La première consiste à vérifier la relation entre les performances dans une application en RV (ici de « navigation » ou de « mémoire spatiale ») et son équivalent en situation réelle. La seconde consiste à vérifier la relation entre performances en virtuel (mais aussi en réel) et questionnaires d'auto-estimation des difficultés quotidiennes.

On a pu constater que cette vérification de la validité écologique est très rarement effectuée dans les études utilisant la RV, que ce soit chez le jeune ou la personne âgée. La comparaison directe entre performances en virtuel et en réel a été effectuée dans quelques études

(Richardson et al., 1999, par exemple) chez les sujets jeunes et ou âgés (Cushman et al., 2008 ; Kalia et al., 2008 ; Kalova et al., 2008). Les résultats obtenus chez les jeunes montrent des performances équivalentes en conditions réelles et virtuelles, quelle que soit les mesures utilisées, supportant ainsi la validité écologique de ces applications. Chez les personnes âgées, cette comparaison a été effectuée dans quelques études seulement, mais dans des situations peu réalistes (versions réelles et virtuelles de la Piscine de Morris ; Kalova et al., 2008) ou peu familières et de petite taille (couloirs d'hôpital ; Kalia et al., 2008 ; Cushman et al., 2008). De plus, peu d'études semblent pour le moment avoir testé les relations entre mesures objectives des performances et auto-estimation des difficultés quotidiennes (Kirasic, Allen & Haggerty, 1992 ; De Beni et al., 2006)

Afin de vérifier la validité écologique de l'application que nous avons utilisé (quartier virtuel de la ville de Bordeaux), le premier objectif de notre thèse est d'effectuer une comparaison directe des performances de navigation et de mémoire spatiale entre des conditions d'apprentissage en « Virtuel » et en « Réel ».

IV.1.b. Rôle des déclin exécutif et mnésiques dans les difficultés de navigation

Comme on a pu le voir dans les parties précédentes, la navigation et l'apprentissage dans les grands espaces sont des activités complexes, dépendantes à la fois des fonctions visuospatiales à petite échelle, des fonctions mnésiques, exécutives (planification, attention, mémoire de travail...), de l'intégration des informations sensorimotrices (Chrastil & Warren, 2012 ; Wolbers & Hegarty, 2010). En effet, la navigation dans des grands espaces nécessite à la fois d'acquérir des connaissances spatiales, d'utiliser ces informations afin de planifier et d'exécuter les trajets et de conserver sa position et son orientation durant ses déplacements (Spiers & Maguire, 2008 ; Spiers, 2008 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Les nombreuses études dans ce domaine ont de plus de montrer l'existence de différentes stratégies de planification durant la navigation dans les grands espaces que ce soit dans des espaces intérieurs ou extérieurs (Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener & Mallot, 2003, par exemple). De plus, les études explorant corrélats neuro-anatomiques de l'apprentissage et la navigation spatial chez l'homme, ont montré l'implication d'un large réseau de structures, comprenant les régions frontales, temporales et pariétales, confirmant ainsi le rôle des fonctionnements mnésique et exécutif dans la navigation (voir Spiers & Maguire, 2007 ; Burgess, 2008, pour examen).

Les études dans le domaine du vieillissement normal, ont permis de montrer un déclin touchant tous les niveaux d'acquisition de représentations de spatiales (landmark, route ou configurationnel), de l'intégration de trajet (Klencken et al., 2012 ; Moffat, 2009), mais également les capacités de navigation (tâches de type « wayfinding ; Head & Isom, 2010 ; Iaria et al., 2009, par exemple). Les études dans ce domaine ont suggéré différentes origines aux difficultés d'apprentissage et de navigation chez les personnes âgées, à la fois mnésiques (relatifs à l'apprentissage d'informations spatiales), exécutives (planification, conservation but en mémoire de travail...) et liés à l'utilisation d'informations sensorimotrices (Wolbers & Hegarty, 2010). Le rôle des déclin mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation a été suggéré par Moffat (2009) et Wolbers & Hegarty (2010) en se basant sur différentes études montrant des modifications du fonctionnement des lobes frontaux et temporaux grâce à des études couplant l'imagerie fonctionnelle et la navigation dans des EV (Antonova et al., 2009). Quelques études ont également montré une relation entre les performances de navigation dans une version virtuelle de la piscine de Morris et certaines mesures de vitesse de traitement, de fonctionnement exécutif et de mémoire (Moffat et al., 2007) et une réduction des volumes des matières grise et blanche des noyaux caudé et du cortex préfrontal. On peut

également noter les études de Foreman et al. (2005) et Iaria et al. (2009) montrant des difficultés pour réaliser des tâches de type « wayfinding » malgré des connaissances de l'espace équivalentes aux sujets jeunes. Ces résultats suggèrent des difficultés à utiliser des informations acquises pour planifier et /ou exécuter leur trajet et donc un rôle du déclin exécutif dans les difficultés de navigation des âgés.

Aucune étude, pour le moment, ne semble avoir testé la relation entre mesures directes (en EV) des performances de mémoire spatiale ou de navigation en situation réaliste, et mesures neurocognitives chez des personnes âgées.

Le but de cette deuxième expérimentation sera donc de vérifier le rôle des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation liées au vieillissement en étudiant les corrélations entre mesures directes (en EV) des performances d'apprentissage et de navigation d'une part et mesures neurocognitives sensibles au fonctionnement mnésique et exécutif. Le but de cette étude sera aussi de vérifier la validité écologique de notre application en analysant la corrélation entre les mesures directes des performances de mémoire spatiale et de navigation d'une part et l'auto-estimation des difficultés de navigation au quotidien d'autre part.

IV.1.c. Activité sensorimotrice et apprentissages spatiaux « Actif/Passif » dans le vieillissement :

Comme nous avons pu le voir dans les études précédentes, les difficultés de navigation chez les personnes âgées ont pour origine à la fois les déclinés mnésiques et exécutifs. IL semble également que les tâches de transfert est efficace pour montrer cet effet. De telles conclusions demandent toutefois des études supplémentaires, en particulier pour répondre à la question importante du rôle des activités sensorimotrices. Ce rôle de l'activité sensorimotrice dans la mémoire spatiale et la navigation a été largement étudié chez les jeunes, notamment grâce à la RV (Chrastil & Warren, 2012) mais restent très peu nombreuses pour le moment chez les personnes âgées. L'utilisation d'interacteurs, comme des joysticks ou des souris (ou même des volants de simulateurs de conduite) a été très vite conçue comme un outil permettant de meilleures performances d'apprentissage et de navigation (Chrastil & Warren, 2012).

Selon la classification de Wilson et al. (1997), l'étude spécifique du rôle des activités motrices s'effectue grâce à la comparaison entre deux type d'exploration : (1) une navigation physiquement passive où le sujet visualise une route préenregistrée dans un EV sans bouger et (2) une navigation physiquement active où le participant utilise un interacteur moteur en respectant les consignes de l'expérimentateur. Cette comparaison est habituellement appelée effet de l'exploration ou de la navigation active (pour revue voir Chrastil & Warren, 2012).

Chez les jeunes, un effet positif de la navigation active sur les performances pour des tâches de type « wayfinding » a été obtenu dans quelques études dans des paradigmes de transfert du virtuel au réel (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, & N'Kaoua, 2008; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2009; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2010; Wallet, Sauzéon, Pala, Larrue, & N'Kaoua, 2011). D'un autre côté, des effets contradictoires de la navigation active ont été obtenus sur les performances d'apprentissage, selon les niveaux de connaissances spatiale (repères, route ou configurationnel) (eg., *pour des effets positifs* voir , Attree, Brooks, Rose, Andrews, Leadbetter, & Clifford, 1996; Péruch, Vercher & Gauthier, 1995; Brooks, Attree, Rose, Clifford & Leadbetter, 1999; *pour aucun effet*, Cutmore, Hine, Maberly, Langford, Hawgood, 2000; Plancher, Nicolas, & Piolino, 2008; Gaunet, Vidal, Kemeny, & Berthoz, 2001; Foreman, Sandamas, & Newson, 2004; Carassa, Geminiani, Morganti, & Varotto, 2002; Farrell, Arnold, Pettifer, Adams, Graham, & MacManamon, 2003; *pour un effet négatif*, see: Sandamas & Foreman, 2007).

On pourrait donc supposer un effet positif de la navigation active chez des jeunes mais cette conclusion reste à vérifier sur les trois niveaux de connaissances spatiales (repères, route et survey).

Concernant l'effet de l'âge, à notre connaissance, aucune étude n'a testé directement les différences liées à l'âge sur des tâches de type « wayfinding », et selon le type de navigation (actif vs passif).

Malgré cela, une seule étude de Plancher et al. (2008), utilisant un simulateur de conduite a testé l'effet des apprentissages « actif vs passif » et les différences liées à l'âge sur différentes composantes de la mémoire épisodique (quoi, où, quand, détails). Après une phase d'apprentissage dans laquelle les participants, en tant que conducteurs ou passagers, devaient apprendre le plus d'informations possibles durant un parcours dans un quartier virtuel. Ils étaient ensuite testés sur le rappel d'objets, les détails concernant ces objets et sur des informations plus « spatiales », sur la position des objets par rapport au corps et le long du parcours, ainsi que sur les changements de direction pris selon des objets rencontrés sur le parcours. Ils n'ont trouvé aucun effet des conditions d'apprentissage « conducteurs vs passagers » sur leurs performances de mémoire spatiale quelque soit la composante testée (épisodique et « spatiale »), suggérant aucun effet l'exploration active sur la mémoire d'objet ou de leur position.

Cette absence de bénéfice de l'exploration active pourrait être interprétée comme effet double tâche se produisant durant la phase d'encodage, dans laquelle les participants n'ont pas assez de ressources dans la condition active pour porter leur attention sur les éléments de l'environnement. Une explication similaire a également été avancée dans d'autres études testant l'effet du contrôle sensorimoteur sur les performances de mémoire spatiale : Lövdén et al. (2005) ont trouvé que la marche sur un tapis roulant sans aide pour maintenir leur équilibre avait un effet négatif sur les performances de mémoire spatiale chez des personnes âgées et pas chez des jeunes.

Les auteurs ont conclu que le contrôle sensorimoteur requis pour toutes les activités sensorimotrices mettait les participants en situation de double-tâche, pour laquelle des difficultés liées à l'âge sont souvent rapportées dans la littérature (Li, Krampe & Bondar, 2005; Riediger, Li & Lindenberger, par exemple). Il semble que les personnes aient tendance à donner la priorité au contrôle sensorimoteur (requérant des ressources en mémoire de travail) par rapport au contrôle plus cognitif lorsque des situations de double-tâche surviennent (phénomène appelé « prioritization » en anglais ; Li, et al., 2005; Dumas, Smolders & Krampe, 2008). Ce phénomène, ajouté aux déclinés exécutifs, mnésiques et sensorimoteur pourrait contribuer au déclin des performances de mémoire spatiale et de navigation lié à l'âge. On peut noter que cet effet double-tâche pourrait être différent entre l'acquisition des connaissances de type « route » et « configurationnel », l'acquisition du niveau « route » semblant plus automatique que celle du niveau configurationnel (Chrastil & Warren, 2012).

Pour le moment, aucune étude n'a testé le rôle de l'âge sur l'effet « actif-passif », spécialement sur les performances de mémoire spatiale et de navigation dans des grands espaces. Le but de cette troisième partie sera donc de tester les différences liées à l'âge sur l'effet de l'exploration « active-passive », sur les performances de navigation (« wayfinding ») et de mémoire spatiale, dans un quartier de Bordeaux. Le but sera également d'étudier leur relation avec le rôle médiateur des déclinés visuospatiaux, mnésiques et exécutifs liés à l'âge.

IV.2. Méthode générale

IV.2.a. Participants

Tous les participants étaient volontaires, droitiers et de langue maternelle française. A partir d'un questionnaire général, ils ont rapporté être en bonne santé et sans aucun troubles visuel, neurologiques ou psychiatriques. Les jeunes adultes ont été recrutés à l'Université de Bordeaux et les adultes plus âgés ont été recrutés dans une université senior à Bordeaux («Université du Temps Libre»).

IV.2.b. Quartier virtuel

IV.2.b.1. Matériel

Tout le matériel et la procédure sont tirés d'études antérieures démontrant la pertinence de l'application en RV portant sur l'étude de la navigation et la mémoire spatiale (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, & N'Kaoua, 2008; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2009; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2010; Wallet, Sauzéon, Pala, Larrue, Zheng & N'Kaoua, 2011). L'environnement virtuel (EV) était une réplique virtuelle du quartier proche de l'hôpital de Bordeaux (Fig. 36). Il a été créé à l'aide du logiciel Virtools ©. Les points de repère importants (panneau, signes et éléments urbains) ont été inclus dans l'EV. L'exploration de l'environnement était immersive comme une navigation réelle. Les participants ont utilisé une manette pour contrôler leurs mouvements dans l'EV et avaient pour consigne d'exécuter les instructions données par l'expérimentateur. L'ordinateur utilisé dans la salle de réalité virtuelle était un Dell ©personal computer (3GHz, 5 Go de RAM) avec une carte graphique NVIDIA© Quadro FX 4400, un projecteur F1 + ©, un écran de 2 x1,88 mètres et d'un joystick de Thrustmaster pour l'exploration.

IV.2.b.2. Procédure

La procédure a été divisée en trois étapes comme suit:

(1) Phase d'entraînement (15 min), où chaque participant a été entraîné à naviguer dans une partie inutilisée de l'EV, afin de permettre aux participants de se familiariser avec la navigation et l'utilisation du joystick dans l'EV, et pour contrôler qu'aucun mal des simulateurs majeur ne se produise (surtout pour les personnes âgées).

(2) Phase d'apprentissage (15 min) où les participants ont appris une route dans l'environnement virtuel, qui mesurait 787 mètres de long, composée de 9 rues, 13 intersections et 11 changements de direction. Durant cette phase, le sujet devait apprendre le trajet en suivant les consignes de l'expérimentateur (tout droit, à droite ou à gauche). Dans la condition active, il se déplaçait à l'aide d'un joystick. Dans la condition passive, l'environnement défilait (de façon automatique) sans que le sujet n'interagisse mais la direction était également indiquée à haute voix lors des intersections pour que les conditions actives/passives soient équivalentes en dehors du paramètre d'interaction (avec ou sans joystick).

(3) Phase de restitution : Deux types de tâches ont été effectuées par les participants après un intervalle de 10 minutes de rétention :



Figure 36 : A- Vue du quartier St Augustin « réel » ; B- Vue de la version virtuelle du quartier St Augustin ; C- Schémas du Parcours utilisé ; D- Vue générale du quartier virtuel

a) Tâche de type « *Wayfinding* » :

Les participants ont été invités à reproduire dans le quartier réel Bordeaux, le parcours appris dans la version virtuelle. Les participants ont été amenés au point de départ dans le quartier réel, correspondant au virtuel et ont dû répéter le trajet appris. Les mauvais changements de direction et les arrêts avant la décision du changement de direction (lorsque les sujets s'arrêtent plus de 5 sec et regarde aux alentours) ont été comptés. Quand une erreur s'est produite après un arrêt, les deux ont été comptés. Si le sujet prend une mauvaise direction, il est ramené dans la direction correcte par l'expérimentateur et doit poursuivre la route. Ainsi, à partir de cette tâche, deux scores ont été calculés: le nombre de mauvaises directions et le nombre d'arrêts durant la tâche « *Wayfinding* », comme mesure de l'utilisation des représentations spatiale pour effectuer la tâche de navigation (Wallet et al, 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre et al, sous presse).

b) Tâches de « *Mémoire Spatiale* », comportant deux parties :

- Une tâche de Dessin de Carte, connue pour être bien effectuée lorsque les participants ont développé une carte cognitive de l'environnement (Wallet et al, 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre et al sous presse..). Le sujet doit dessiner la route apprise dans l'EV sur une feuille de papier blanc. Le dessin devait être fait de segments connectés, représentant les trajets linéaires et les changements de direction. Le score correspond au nombre de directions correctes (le score maximum est 11).

- Une tâche de Classification de photos, connue pour être bien réalisée lorsque les participants ont développé une bonne connaissance de l'itinéraires effectué, c'est-à-dire du niveau « route » (Wallet et al, 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre et al, sous presse): l'objectif de cette tâche était de donner l'ordre chronologique de 12 images correspondant à des points

de vue du quartier rencontrés le long du parcours. Le score est un score séquence: 1 point est accordé si la position de la photo correspond à sa position correcte dans la séquence globale et un demi-point si la position est incorrecte, mais si la photo qui suit immédiatement est la bonne. Le score maximum est 12. D'après ce qui précède, la classification des photos et la tâche de dessin de carte ont été utilisés comme mesures des représentations de type "Route" et "Survey", respectivement. L'ordre des tâches a été contrebalancé entre les sujets.

IV.2.c. Evaluations neurocognitives

Plusieurs tests neuropsychologiques ont été administrés à chaque participant afin d'évaluer leur fonctionnement cognitif, en ciblant deux principaux domaines cognitifs: *Mémoire visuospatiale (VS-M)* et *Fonctionnement visuo-spatiales et exécutif (VS-EF)*. En outre, les participants ont rempli des questionnaires sur leurs difficultés visuospatiales *quotidiennes (EVSD)*, avec deux sous-scores portant respectivement sur les problèmes de navigation et de mémorisation des objets. Ces tests ont été administrés avant et après les phases d'entraînement et d'apprentissage en RV et leur ordre sont contrebalancés entre les sujets.

- *Vocabulaire* : Adaptation française de l'Échelle de vocabulaire Mill Hill (Deltour, 1993).

- *Mémoire visuospatiale (VS-M)*: test de reproduction visuelle, comprenant les rappels libre immédiat et différé et la tâche de reconnaissance de la WMS-III (Wechsler Memory Scale-III; Wechsler, 1997).

- *Fonctionnement exécutif et visuospatial (VS-EF)*:

-Les capacités de *Rotation Mentale* (ie., le test de Rotation Mentale (RM) de Vandenberg & Kuse, 1978) : Ce test comporte 20 questions réalisées en deux fois trois minutes. Il consiste à déterminer si deux figures en 3D composées de cubes et orientées différemment dans l'espace, sont identiques ou miroirs l'une de l'autre.

-La *vitesse de traitement* avec le test « Digit Symbol Coding » (DSC, sous-test du WAIS-R, Wechsler, 1981) : le test comporte une grille comportant des symboles correspondant à des chiffres de 1 à 9. Il s'agit de recopier, en 1 min 30, le plus de figures possibles dans une grille vide comportant des chiffres de 1 à 9, en série aléatoire.

-La *mémoire de travail et la mémoire à court terme* avec les tests « Digit Forward Span » et « Backward Digit Span » de la WMS-III: Ces deux tests utilisent une planche comportant des cubes. Le but, dans ces tests, est de reproduire les séries de touches réalisées par l'expérimentateur. Le test commence par 2 touches, puis 3... jusqu'à 9 touches, avec 2 tests à chaque série de même longueur. Le « Digit Forward Span » nécessite de reproduire ces séries dans le même ordre, le « Backward Digit Span » nécessite de reproduire ces séries dans le sens inverse de celle réalisée par l'expérimentateur. Le test s'arrête lorsque le participant fait deux erreurs successives à deux séries de même longueur et le score correspond au nombre de séries correctes réalisées.

- L'exécutivité à l'aide de la partie A du Trail Making Test (TMT A, Reitan, 1992) : ce test consiste à relier à l'aide d'un crayon des chiffres sur une feuille en respectant l'ordre croissant.

-La *flexibilité cognitive* avec la partie B du Trail Making Test (TMT B, Reitan, 1992) : ce test consiste à relier, à l'aide d'un crayon, des chiffres et des lettres en alternance sur une feuille, en respectant l'ordre croissant pour les chiffres et l'ordre alphabétique pour les lettres.

-Les capacités de raisonnement inductif avec le test des Matrices de Raven (forme standard; Raven, Raven & Court, 2003) : il comporte des séries de questions nécessitant de compléter des problèmes de raisonnement utilisant des figures géométriques.

- Les capacités de *planification* avec le test Porteus Mazes (Porteus, 1950) : ce test comporte une série de labyrinthes correspondant à différents âges (5, 6 ... à 14 ans et 1 pour l'âge adulte). Ce test nécessite de tracer, aussi vite que possible, le trajet permettant de sortir des labyrinthes, en évitant de traverser les parois, sans faire demi-tour et sans lever le crayon. Les arrêts durant le tracé sont autorisés. Les labyrinthes 5 à 11 permettent deux essais, les labyrinthes 12, 14 et adultes permettent 4 essais. Plusieurs scores peuvent être construits : l'âge de base correspond au dernier âge de labyrinthe sans erreur. Un second score est issu d'une somme de points correspondant au nombre d'essais nécessaires pour chacun des âges. Pour les âges 5 à 11, 1 point pour un essai, 0.5 point pour deux essais, 0 en cas d'échec. Pour les âges 12 et 14, deux points pour une réussite au premier essai et 0.5 point enlevé pour chaque essai en plus. Pour le labyrinthe adulte, 2 points sont donnés si 1 ou 2 essais sont nécessaires, 1.5 points pour trois essais, 1 point pour 4 essais. Le score global est la somme de l'âge de base et du second score.

IV.2.c. Questionnaires

Une version française du Questionnaire de mal du simulateur (SSQ, Kennedy, Berbaum & Drexler, 1994), est proposé juste après la phase d'apprentissage dans les EV. Il permet de mesurer la gravité des symptômes induits par les simulateurs 3D. Les participants ont également eu à indiquer leurs expériences des nouvelles technologies, des ordinateurs et des jeux informatiques (NTIC) (Moffat et al., 2001) et à remplir un questionnaire concernant leur âge, sexe, latéralité, niveau d'éducation et cursus universitaire.

Les difficultés de navigation et d'orientation au quotidien ont été évaluées avec le « Spatial Orientation Questionnaire » de Skelton (sous-scores « Wayfinding » et « Mémoire d'objets »; Skelton, Bukach, Laurance, Thomas & Jacobs, 2000) ou le Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD, Hegarty et al., 2004).

Chapitre V: Age-related differences and cognitive correlates of Self-reported and Direct navigation performance: effect of real and virtual test condition manipulation.

(Article soumis à Journal of Experimental Psychology : General)

Authors: Marie Déjos, Hélène Sauzéon, **Mathieu Taillade**, Florian Larrue, Bernard N’Kaoua.

Abstract: The present study addressed the issue of the loss with aging of the relationship between direct navigation measurements and the self-reported ones according to the real – laboratory test manipulation. Navigation (wayfinding task) and spatial memory (paper-pencil tasks) performance, obtained either in real-world or in virtual-laboratory test conditions, were compared between young (n=32) and older (n=32) adults who had self-rated their everyday navigation behavior (SBSOD scale, Hegarty et al. 2002). Self-reported and direct navigation performance were correlated with classical measures of general cognitive functioning (MMS) and also with those of spatial abilities, and executive and memory functioning.

Minor, but real, age-related differences are observed in navigation tasks while strong age-related differences are found in paper-pencil tasks investigating spatial learning relative to the distinction between survey-route knowledge. The manipulation of test conditions (real vs. virtual) did not modify these age-related differences. Overall, significant correlations were observed between the elderly subjects’ navigation performance in virtual device and some executive and memory measurements, while such correlations were less, or even not observable, for real-world performance. Furthermore, elderly adults did not differ from young adults in their self-reporting relative to everyday navigation, suggesting some underestimation of navigation difficulties by elderly adults. For young adults, correlations between the direct and the self-reported navigation performance depended on the real vs. virtual-laboratory test manipulation while no correlation was observed for older adults. A major result was that age-related changes in correlation between self-reported and navigation performance are largely due to changes in their cognitive correlates. Contrary to the case with young adults, the self-estimates in older adults are not specifically correlated with the actual navigation performance or spatial abilities, but only with the general cognitive and memory measurement. So, it is assumed that the older adults achieved the navigation tasks with lesser available spatial abilities compared with young ones, with the constraint that their navigation awareness is less accurate because it is only based on self-perception about their own general cognitive decline.

Keywords: aging, navigation and spatial learning, self-reported navigation functioning; real and virtual tests

Spatial orientation and wayfinding ability in familiar and unfamiliar environments are critical for daily functioning and living independently. Even in advanced age, many elderly people remain able to perform efficiently self-orientation tasks in familiar environments, but they often exhibit some difficulties when the environment is unfamiliar (e.g., Willis, 1991; Kirasic, 1989; Baroni & De Beni, 1995). In general, when an age-related decline is reported, it is explained as the inability to acquire new spatial learning or to implement the strategic navigation behavior required in unknown large-scale environments (Klencklen et al., 2012). Such interpretations are mainly claimed in laboratory-based studies (for reviews, Moffat, 2009; Klencklen et al., 2012). Nevertheless, elderly people self-report few everyday navigation complaints even when they are specifically consulted about outdoor displacements in unfamiliar or unknown environments as proposed in auto-questionnaires investigating everyday spatial disorientation, as in the Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD, Hegarty et al., 2002) (Burns, 1999; Baroni & De Beni, 1995; De Beni et al., 2006; Kirasic et al., 1992; Taillade et al., in preparation). This pattern of results in elderly navigation performance may be seen as indicating a dramatic decline during more abstract and laboratory tests, but adequate or nearly normal performance in more everyday tasks (De Beni et al., 2006). To address this issue with age-related differences in navigation behavior, we proposed to directly compare wayfinding and spatial learning performance from an urban district, either through direct experience (real condition) or with its more abstract experience in using a virtual replica (virtual-laboratory test). In addition, the age effect in relationships between the self-reported and the direct navigation measurements was examined in respect of real-laboratory conditions. Indeed, the lack of navigational complaint in the elderly indicates either they have no everyday navigation problems or they do have problems but their self-reporting is inconsistent. The latter case means that the self-reported measurements of everyday navigation performance in the elderly do not mirror actual navigation difficulties. Therefore, the present study challenges also the issue of the age-related loss of the relationship between the direct navigation measurements and the self-reported ones according to the real –laboratory test manipulation.

Concerning direct measurements of navigational processing, first, an age-related decline in spatial learning and memory performance is reported for large-scale environments irrespective of the level of spatial representations considered, according to the Landmark-Route-Survey model by Siegel et White (1975) (for review, see Moffat, 2009). Difficulties for landmark memory after navigation in real environments have been reported (e.g., Monacelli et al., 2003), and have been confirmed using virtual environments (Cushman, et al., 2008; Head & Isom, 2010; Jansen, et al., 2010). Route memory difficulties were found in laboratory-based studies using series of pictures (Lipman & Caplan, 1992) after navigation in real environments (e.g., Monacelli et al., 2003). These difficulties were reproduced in virtual mazes composed of hallways (e.g., Head & Isom, 2010; Moffat, et al., 2001) or in more realistic virtual-environments (virtual house: Meulenbroek, et al., 2004; virtual town: Head & Isom, 2010; Plancher, et al., 2010; virtual hospital: Cushman et al., 2008). Difficulties for the development of survey knowledge from navigation in real environments were also found (Kirasic, 1991; Simon, et al., 1992) and replicated in virtual applications (virtual mazes composed of hallways: Head & Isom, 2010; Jansen et al., 2010; Moffat, et al., 2006; virtual districts: Iaria, et al., 2009; virtual buildings; Lövdén, et al., 2005).

Secondly, a decline associated with aging has also been reported in navigational and wayfinding performance, for instance in a human version of the Morris Water Maze by Newman & Kaszniak (2000). These results have been replicated in virtual versions of this

maze (e.g., Antonova et al., 2009; Moffat & Resnick, 2002; for review, see Moffat, 2009). In other kinds of maze, Head and Isom (2010) show an age effect in a wayfinding task, as well as in locating targets, recalling landmarks, and recognizing environmental scenes. In more familiar environments, Iaria et al. (2009) showed age-related differences in the speed of learning the topography of a virtual district, but also in wayfinding performance (i.e., reaching for the targeted landmarks). Also, Lövdén et al. (2005) assessed navigation performance using a virtual museum, in which participants had to learn its configuration in order to be able to find a specific position in the virtual museum itself or to place pictures of landmarks on a map, and they report age differences in both tests. So, the decline in spatial learning and wayfinding abilities with aging are obtained with virtual environments irrespective of their realism.

From the overall data, it can be observed that most of the evidence of age-related differences in navigational processing is produced by laboratory studies using virtual reality (VR)-based navigational tasks. The popularity of VR-based navigational tasks is mainly due to the fact that they allow laboratory investigations of large-scale spatial cognition by simulating environments and navigational activities from which measurements of cognitive and sensori-motor mechanisms can be accurately and reliably inferred according to the laboratory design setting (Loomis et al., 1999). Most importantly, when these VR-based tasks afford naturalistic contents, such as walking displacements in an urban district, they challenge the ecological validity issue surrounding the use of laboratory situations. In this vein, we have recently reported intriguing results relative to wayfinding performance of young and older adults for a task requiring a transfer of spatial learning from a virtual to a real environment (Taillade et al., 2012). Indeed, age-related differences in the wayfinding scores as well as in spatial learning measurements contrasted with unchanged self-reported navigation performance by age. And, the direct wayfinding performance was strongly related to the self-reported navigation performance only when the age factor was partialled-out. Kirasic, Allen, & Haggerty (1992) have recently reported similar results to ours. This indicated an age-related loss of relationships between the direct and self-reported navigation performance. Also, this suggested that the older adults were probably less aware of, or less accurate in their judgments of, navigational functioning for walking situations than young ones, probably in relation to age-related metacognitive difficulties well known in the cognitive aging field (Vanderhill, Hulstsch, Hunter, & Strauss, 2010). However, more evidence is required to support this statement, and notably to demonstrate that this relationship loss with age has not been confused with a possible laboratory-test effect as suggested by De Beni et al., (2006). Indeed, the failure of relationships between the direct and self-reported navigation performance would seem to have occurred in the elderly group only when navigation measurements are derived from virtual-laboratory tasks but not with those directly collected in real-world test conditions. In this case, this would mean that the relationship loss with age might be artificial in virtual-laboratory tests. The study by Hegarty et al. (2006) probably gives some insight into the understanding of influences of real vs. laboratory effects on relationships between self-reported and direct navigation performance. They have demonstrated in young adults that measurements of spatial abilities (such as those explored by the Mental Rotation Test of Vandenberg & Kuse, 1978) were relatively more predictive of learning of naturalistic environments from VR based media than of learning from direct experience, whereas self-reported sense of direction was relatively more predictive of learning from direct experience than from VR based media. To our knowledge, such an investigation in elderly adults is not currently available, yet it should

probably be relevant to validate, or not, an age-related loss of relationship between direct and self-reported navigation performance. So, a major aim of our study was to compare the relationships between the direct and self-reported navigation performance in young and older adults according to real vs. VR-based test manipulation.

There are three studies that have addressed age-related differences in navigational processing in comparing real to virtual environment conditions. First, Kalia et al. (2008) have compared the effect of various conditions of encoding situations on several spatial measurements in three groups of participants—younger (< 50 years old) normally sighted, older (50–70 years old) normally sighted, and low vision (people with differing forms of visual impairment, ranging in age from 18–67). Despite the fact that this study focused on the effect of visual impairment in the elderly for layout learning, the results highlighted comparable age effects from real or virtual learning conditions. In the second, Kalová et al. (2005) have compared virtual and real-world navigation tasks by using a human version of the Morris water-maze (i.e. a circular arena equipped with a computerized tracking system) and asked elderly participants (elderly and AD patients without signs of dementia) to locate one or more unmarked goals using the arena geometry, their starting position and/or cues being on the arena wall. The results indicated that navigation performed in the real world and that done using a similar computer version yielded comparable results. Finally, Cushman et al. (2008) have found results consistent with those of Kalová et al. (2005), and report a strong correlation ($R^2 = 0.73$) between the performance of spatial tasks carried out in the real lobby of a hospital and in a similar virtual-world situation. Taken together, these results suggested real-virtual differences in spatial measurements, but also actual age-related differences in the real tests as well as in virtual-laboratory tests. As already mentioned, contrary to the study by Hegarty et al. (2006) in young adults, these aging studies did not include analyses of relationships between the self-reported navigation and (real vs. laboratory) direct performance, and thus the issue of the loss of linkage between the self-reported sense of direction and real spatial navigation performance remains open.

Also, according to the findings by Hegarty et al. (2006), the unchanged age differences in direct navigation scores in respect of the real vs. VR-based test manipulation may suggest that the aging changes in spatial abilities and their impact on the elderly's navigation behavior (Kirasic, 2000) are equivalent in the real and in virtual-laboratory tests. In other words, this assumes the aging decline in spatial abilities should play a minor role in the age-related differences observed in naturalistic navigation behavior. This assumption should be addressed by studying the role of the decline in spatial navigation in the older subjects' navigation behavior collected in real as well as in virtual-laboratory test conditions. Logically, if the decline in spatial abilities with age is not critical in the age-related differences in direct navigation performance, then other cognitive mechanisms sensitive to aging should likely contribute. It is well known that older subjects' navigational performance is closely related to their ability in remembering route-to-be-performed in the environment as well as to the planning and the execution of goals-to-be-reached in the sequencing of the route. Considerable laboratory-based evidence has supported that age-related differences in navigation behavior are widely mediated by memory decline as well as by the age-related decline in executive functioning (e.g. Antonova et al., 2009; Driscoll et al., 2003; Meulenbroek et al., 2004; Moffat et al., 2006; Moffat, Kennedy, Rodrigue, & Raz, 2007 ; Taillade et al., in preparation ; for review, Moffat, 2009;). In contrast, to our knowledge, no aging study has investigated the role of memory or executive functioning in relation to self-reported navigation functioning and direct navigation performance. Instead, many

researchers have been predominately interested in self-reported memory functioning and memory test performance. They have shown that self-rated memory functioning is only moderately related to the actual memory test performance of elderly individuals (Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012; see Hertzog & Hultsch, 2000; Hertzog and Dunlosky, 2011, for reviews), and the relationship seems to be stronger for naturalistic tasks than for laboratory tasks (West, Dennehey-Basile, & Norris, 1996). The self-reported memory inconsistency in older adults is often reported as being related to aging decline in both memory and executive functioning (e.g., Chua, Schacter & Sperling, 2009; see Hertzog and Dunlosky, 2011, for review). Drawing on aging studies already undertaken in the memory domain, various explanations could be offered for why older adults do not accurately judge their performance in navigation tests. Among them, one explanation is that self-reporting of cognitive functioning is based on executive monitoring of feedback from the performance (e.g., Rhodes & Kelley, 2005). Indeed, feedback from performance helps to correct self-perceptions, so executive monitoring disruptions with aging may explain erroneous self-perceptions (Hertzog & Dunlosky, 2011). Feedback may itself be biased, difficult to interpret, or otherwise flawed, so that it does not become integrated into the executive inferential processes that lead to accurate estimates of one's own abilities (e.g., Carter & Dunning, 2008, Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012). It is also possible that memory disruptions that come with normal aging result in phenomena such as forgetting the navigation incidents in everyday life, and this, in turn, might contribute to an optimistic appraisal of one's own navigation functioning (see, Rabbit et al., 1995; Souchay et al., 2007; Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012, for such interpretations in the aging memory domain). Consequently, the self-reported navigation inconsistency in older adults could also be expected to be related to aging decline in both memory and executive functioning.

Based on the above data, the aim of this study was to investigate the age-related differences in spatial navigation tasks performed either in real environments or in virtual replicas, and then to study the relationships between the self-reported navigation performance and the direct navigation test performance according to the real vs. virtual-laboratory test manipulation. We expected lower navigation performance in virtual-laboratory test conditions compared to real test ones. It was further hypothesized that the relationship between self-reported measurements and actual performance would be stronger in young adults than that found in older adults, and more especially in real test conditions compared to virtual-laboratory test ones. Finally, we also studied whether cognitive mediators such as spatial abilities, memory and/or executive functioning, play a role with age in the self-reported and the direct navigation performance as well as in their relationships. Cognitive abilities that are more critical in the awareness of navigation behavior in everyday life, such as executive functioning (e.g., required in the ability to monitor navigation errors as erroneous direction changes and then to implement adaptive use of control strategies based on that monitoring) and memory (e.g., required for remembering experiences of memory failures for locations or routes) could be expected to be decisive in explaining the age changes in the relationships between self-reported and direct navigation performance.

METHOD

Participants

In all, we recruited 64 adults - 32 young healthy adults (mean age = 22.65; SD = 3.29) and 32 older adults (mean age = 68.58; SD = 6.13). All of the participants were volunteers, native French speakers and right-handed. From a general questionnaire, they reported that they were healthy and without any visual, neurological or psychiatric disorders. Young adults were recruited at the Segalen University of Bordeaux and the older adults were recruited from a 'Senior' University in Bordeaux ("Université du Temps Libre"). Older adults underwent the MMSE (Folstein et al., 1975) as an exclusion criterion (exclusion for a score < 27). All of the subjects under virtual-laboratory condition had to complete a French version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ; Kennedy et al., 1994) immediately after the learning phase. This questionnaire measures the severity of sickness induced by 3D simulators. Participants also had to rate their own technology experience with computers and computer games (New Technology of Information and Communication-NTIC questionnaire, Moffat et al., 2001). There were no significant inter-group differences SSQ score ($p>.05$), and education level ($p>.05$) (table 1). A group effect was reported for the NTIC score [$t(30)=4.03$; $p<.001$].

Table 1: Demographic characteristics of participants.

	F/M	age	NTIC	Educational level	SSQ	MMSE
Younger	16/16	22.66 (3.24)	15.25 (3.55)	14.19 (1.79)	14.27 (21.34)	-
Older	17/15	68.44 (6.09)	9.75 (4.16)	13.56 (3.56)	44.40 (111.99)	29.19(.06)

- **Neuro-cognitive Assessment:** A set of neuropsychological tests was administered to each participant to assess their cognitive functioning assessing three main cognitive domains: spatial abilities (Spa), visual memory (Mem) and executive functioning (Exe).

- **Visuo-Spatial abilities (Spa):** The Spa evaluation included *mental rotation abilities* (i.e., The Mental Rotation Test (MRT) by Vandenberg & Kuse, 1978), *processing speed* with the Digit Symbol-Coding test (DSC, subtest from WAIS-R, Wechsler, 1981), *short-term and working memory* with the Forward and the Backward Corsi Span Tests (BCS) of the WMS-III.

- **Visual memory (Mem):** The immediate Visual Reproduction Test from the Wechsler Memory Scale-III (WMS-III, Wechsler, 1997) and the Benton Visual memory test (Benton, 1965) were used.

- **Executive functioning (Exe):** This evaluation included *cognitive flexibility* with part B of the Trail Making Test (TMT- B, Reitan, 1992), *planning abilities* with the Porteus Maze Test (Porteus, 1950) and *inductive reasoning abilities* with Raven's Matrices Test (standard form; Raven et al., 2003).

- **Self-reported navigation Performance:** the participants completed questionnaires about their *everyday visuo-spatial and navigation difficulties* according to the Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD, Hegarty et al. 2002). The SBSOD has been demonstrated as mainly related to tasks of spatial knowledge that involve orienting oneself within the environment, such as navigational tasks, than with tests that involve estimating distances or drawing maps (Hegarty et al. 2002).

All these tests were administered before and after the spatial learning and navigation tests in real or Virtual-laboratory environment conditions, and their order was counter-balanced between subjects.

For each group, the mean values of all neuropsychological measurements are presented in table 2.

- **Direct Spatial learning and navigation Performance:** Within a two-step task including spatial learning of a route followed by a route wayfinding test, two main experimental conditions were manipulated: the Real-world Environment (RE) and Virtual-laboratory Environment (VE).

The *Real-world Environment* consisted of a district near Bordeaux's hospital while the *Virtual-laboratory environment* was a replica of the real-environment (i.e. the district near Bordeaux's hospital) (Figures 1 & 2) created using the Virtools© software. Significant landmarks (signposts, signs, and urban furniture) were included in the VE. The walking displacements in the VE were simulated with the manipulation of a joystick for implementing translational and rotational movements that serve the locomotion in the VE. The apparatus used in the VR room was a HP EliteBook 8540p © personal computer (Intel® Core™ i5 CPU processor in 2.40GHz, 2 Go RAM) with a NVIDIA© graphics card, a EpsonX EB ©1925W projector, a 2×2-meter screen and a Saitek® X52 Flight System joystick for exploration.



Figure 1: Example of view from RE and VE used for navigational task.

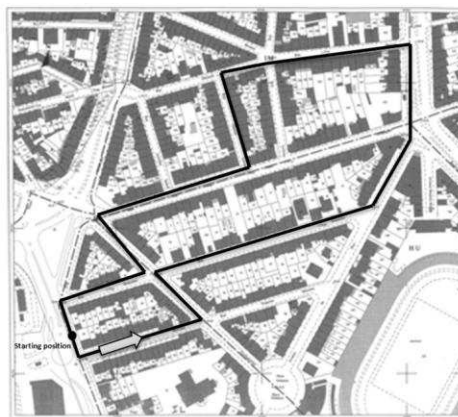


Figure 2: The route learned by the participants

Young and older participants were divided into four groups for assignment to the two experimental conditions (RE vs. VR). A training phase (5 minutes) was administered to the participants assigned to the VE condition, where each participant was trained to navigate in an imaginary VE, to allow the participants to familiarize themselves with the virtual navigation and joystick use and to confirm that none of the participants had major simulator sickness (mostly for the older adults).

The procedure was divided into two steps as follows:

(1) a learning phase (average 15 minutes) where the participants learned a route, in the RE or VE; specifically, the participant was brought to the starting point in the real or virtual district and walked to learn a route (composed of ten streets, 13 intersections and 11 changes of direction and was 787 meters long) in accordance with the instructions given by the tester. Subjects were instructed to pay attention to the route because they would later undergo testing related to it.

(2) a restitution phase, where two kinds of task were performed by the participants soon after the learning phase in counter-balanced order.

- *A wayfinding task*: The participants were asked to replicate the route that they learned in the same environment used for learning (respectively, RE or VE). To this end, the participant was brought to the starting point in the environment and had to recall the route. Wrong turns and stops before deciding to change direction (when the subject stops more than five seconds and looks around) were counted. When a mistake occurred after a stop, both were counted. If the subject made a wrong decision, he was shown the correct direction by the tester and allowed to continue on the route. Thus, two scores were calculated from this task: the number of direction errors (wrong turns) and the number of stops during the wayfinding task, as a way of studying the use of spatial representation to perform a navigational task (Lapeyre, et al., 2011; Wallet et al., 2009, 2010, 2011).

- *Spatial Memory tasks*: - *A picture classification task*, known to be performed well when participants have a well-developed knowledge of the route, was administered to the participants (Lapeyre et al., 2011; Wallet et al., 2009, 2010, 2011). The task consisted in ordering chronologically 12 pictures that corresponded to different points of view of the district encountered along the route during the learning phase. The score is a sequence score: 1 point is given if the photo position corresponds to the correct position in the overall sequence and half of a point is given if the position is incorrect but near a picture that immediately follows with respect to the chronological order. The maximum score is 12.

A map drawing task, known to be performed well when participants have developed a good spatial cognitive map of the environment (Lapeyre et al., 2011; Wallet et al., 2009, 2010, 2011): the subject is required to draw the route learned on a blank sheet of paper. The drawing has to be made of connected segments, representing the linear locomotion and direction changes. The score is the number of correct directions given from the beginning of the route. The maximum score is 11.

All of the material and procedures are derived from previous studies in the spatial learning and navigation domains (Wallet et al. 2009; 2010; 2011).

ENVIRONMENT OF LEARNING AND RESTITUTION	YOUNG GROUP		OLDER GROUP		ANOVA (Group * Test) <i>significant effects</i>
	RE (mean ± SD)	VE (mean ± SD)	RE (mean ± SD)	VE (mean ± SD)	
MMSE(a)	-	-	29.25 (.68)	29.125 (1.03)	t(30)=.406 ; p>.05
VISUO-SPATIAL ABILITIES					
Mental Rotation Test (b)	21.19 (7.69)	22.31 (8.36)	8.13 (3.90)	9.13 (6.21)	group effect: F(1,60)=60.326 ; p<.0001
Digit Symbol Coding Test (c)	69.88 (11.48)	66.69 (12.13)	45.44 (9.47)	44.38 (9.15)	group effect: F(1,60)=77.362; p<.0001
Forward Corsi Span Test (d)	9.25 (2.35)	8.38 (1.59)	8.13 (1.63)	7.63 (2.19)	
Backward Corsi Span Test (d)	8.63 (2.34)	8.25 (1.29)	6.81 (1.52)	7.00 (2.10)	group effect: F(1,60)=10.864; p<.01
VISUAL MEMORY					
WMS3: Immediate Recall of visual memory (e)	96.50 (14.72)	95.81 (9.18)	86.25 (11.13)	86.63 (12.34)	group effect: F(1,60)=10.472; p<.01
Visual recognition of Benton Test (f)	14.63 (.72)	14.19 (1.05)	13.13 (1.31)	13.63 (1.21)	group effect: F(1, 60)=13.489; p<.001
EXECUTIVE FUNCTIONING					
TMT B (g)	36.92 (11.84)	35.13 (12.60)	68.53 (25.35)	79.12 (28.41)	group effect: F(1,60)=37.855; p<.0001
Porteus Maze Test (h)	22.94 (3.31)	23.38 (3.47)	22.19 (2.53)	20.00 (2.80)	group effect: F(1,60)=7.330; p<.01
Raven's Matrices Test (i)	55.94 (2.89)	53.32 (6.60)	44.44 (5.18)	45.69 (6.83)	group effect: F(1,60)=46.700; p<.0001
SELF-REPORTED NAVIGATION PERFORMANCE					
SBSOD (j)	53.69 (10.34)	54.63 (13.04)	55.81 (16.43)	52.00 (15.84)	

Table 2: Participants' scores on the neuropsychological assessments and ANOVAs (Group*Test) results.

(a) Mini Mental State Examination, Folstein et al. 1975 ; (b) The Mental Rotation Test, Vandenberg & Kuse, 1978 ; (c) DSC: Digit Symbol coding test, WAIS-R subtest, Wechsler, 1981; (d) Corsi subtest of Wechsler Memory Scale-III, Wechsler, 1997; (e) Wechsler Visual Reproduction Test of Wechsler Memory Scale-III, Wechsler, 1997; (f) Visual recognition of Benton, Benton 1965; (g) Trail Masking Test, part B, Reitan, 1992; (h) Porteus Maze Test, Porteus, 1950; (i) Raven's Matrices Test standard, Raven et al. 2003; (j) the Santa Barbara Sense of Direction Scale, Hegarty et al. 2002.

RESULTS

- **Neuro-cognitive Assessment (Table 1):** Two-way ANOVA [2 (Age group: young; old) x 2 (Environment: RE; VR)] analyses were carried out on each neuropsychological measurement. The results are summarized in table 1. None of these analyses indicated a simple or interaction effect including the condition assignment factor. In contrast, an age effect was significantly observed in all the dependant measurements relative to the three cognitive domains of interest for navigation behavior. Indeed, the young performed better than their older counterparts for spatial abilities (Spa), visual memory (Mem) and executive functioning (Exe) measurements (Table 1). Clearly, no age difference was observed in the forward Corsi test as the result of the intact short-term memory with normal aging (Klencklen et al. 2012).

-**Self-reported navigation performance from SBSOD (Table 1):** A two-way ANOVA [2 (Age group: young; old) x 2 (Environment: RE; VR)] analysis failed to find any significant effect. Indeed, SBSOD scores were nearly equivalent in both the young and the older groups.

- **Direct Spatial learning and navigation Performance:** Two-way ANOVA [2 (Age group: young; old) x 2 (Environment test: RE; VR)] analyses were carried out on each spatial learning and navigation measurement. The results are presented in figures 3 and 4.

- *For the Wayfinding task:* the wayfinding errors were higher in the older group than in the young one [$F(1,60)=6.155$; $p<.02$]. Also, they were higher in VE conditions than in the RE ones [$F(1,60)=7.383$; $p<.01$], but the interaction effect between the age and the Environment test factors was not significant ($p>.10$). Also, the wayfinding stops were higher in VE test than in RE test conditions [$F(1,60)=11.314$; $p<.01$]. So, no other effect including the age variable was significant ($p>.09$).

- *For spatial memory tests:* A performance superiority of the young group compared with the older group was observed for the picture classification [$F(1,60)=6.253$; $p<.02$] as well as for the sketch drawing [$F(1,60)=15.932$; $p<.001$]. By contrast, no other effect including the Environment factor was significant ($p>.50$).

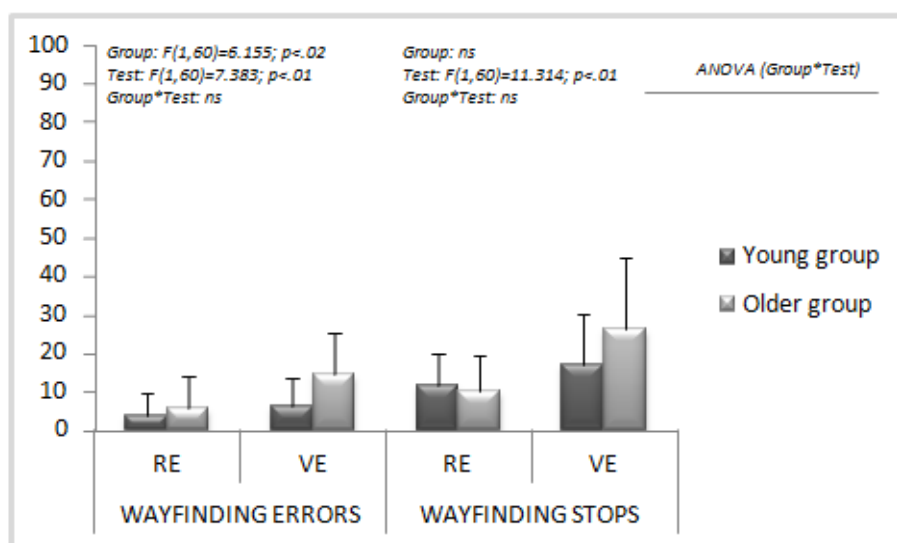


Figure 3: Percentage of errors and stops for wayfinding according to RE and VE conditions for each group of subjects; ANOVAs (Group*Test) results.

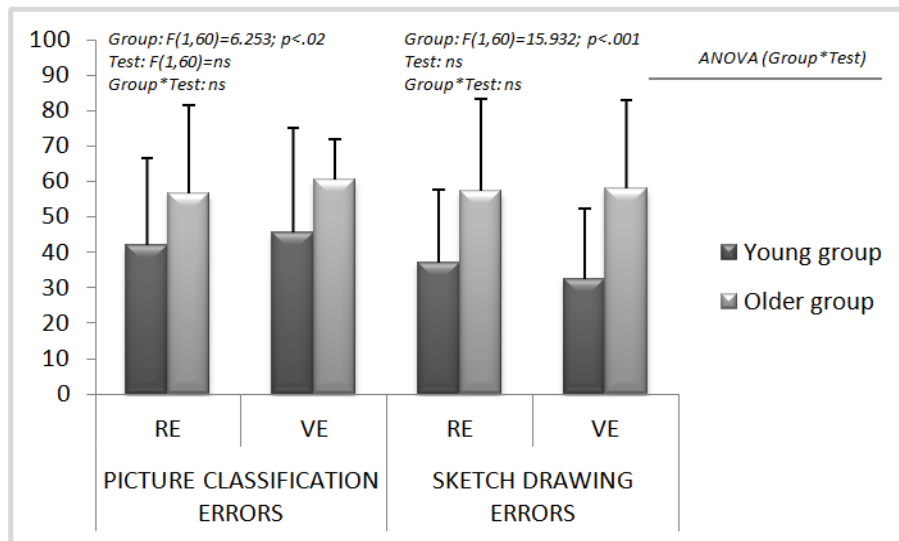


Figure 4: Picture classification errors (percentage) and sketch drawing errors (percentage) according to RE and VE conditions for each group of subjects; ANOVAs (Group*Test) results.

To assess the relationships between self-reported and direct navigation measurements, a set of correlation analyses was performed for each age group (young and old). Additionally, correlation analyses were carried out between either the direct or the self-reported navigation measurements and the cognitive measurements relative to spatial abilities, visuo-spatial memory and executive functioning.

Correlations between Direct and self-reported navigation performance: For the young subjects, the self-reported navigation performance provided by SBSOD scores was marginally correlated with the direct navigation performance (number of stops) exhibited in the RE condition ($r=.461$; $p<.08$). By contrast, no significant correlation was observed for the direct navigation behavior measured in the VE conditions. For the older subjects, no significant correlation was observed between the self-reported navigation performance and the direct navigation behavior measurements irrespective of the environment conditions (RE vs. VE).

Correlations between Self-reported navigation performance and neuro-cognitive measurements: In the young subjects, the self-reported navigation score was only correlated with the mental rotation score [$r=-.416$; $p<.02$] as a measure of spatial abilities. In contrast, in the older subjects, the self-reported navigation score was correlated with a memory measurement (i.e., Visual Reproduction Test of Wechsler Memory Scale-III) [$r=-.37$; $p<.04$] as well as with the MMSE score [$r=-.34$; $p<.05$].

Correlations between Direct navigation performance and neuro-cognitive measurements: In young subjects, no significant correlation was found between the direct navigation score under RE conditions and the cognitive abilities measured (spatial abilities, memory and executive functioning). In contrast, the wayfinding errors under VE conditions as direct navigation scores were significantly correlated with two scores relative to spatial abilities,

respectively the mental rotation score [$r=-.48$; $p<.05$] and the Digit Symbol-Coding test [$r=-.59$; $p<.01$].

		(a)	SP-A			V-MEM		EXE-F			(j)		
		MMSE	(b) MR	(c) DSC	(d) FCS	(d) BCS	(e) WMS	(f) Benton	(g) TMT	(h) Porteus	(i) Raven	SBSOD	
YOUNGER	RE												
		Wayfinding errors	-	.35	.03	.35	-.39	.21	-.10	.19	-.08	-.01	-.22
		Wayfinding stops	-	.00	.30	.18	.26	.39	-.22	-.18	-.05	-.14	.46~
	VE												
		Wayfinding errors	-	-.47*	.59*	.28	.10	-.13	-.24	-.29	-.08	-.01	.35
		Wayfinding stops	-	-.24	.08	-.15	.10	-.11	.05	.03	-.05	-.14	.41
	SBSOD	-	-.42*	.02	-.00	-.04	.19	-.05	.07	.08	-.32~	-	
OLDER	RE												
		Wayfinding errors	-.73**	-.22	-.12	-.14	-.11	.28	.00	.20	-.23	-.16	.28
		Wayfinding stops	-.35	.41	-.12	.05	.04	.45~	-.24	-.12	-.08	.22	.12
	VE												
		Wayfinding errors	-.27	-.03	-.21	.01	.02	.03	-.53*	.51*	-.07	-.27	.25
		Wayfinding stops	.12	-.04	.36	.31	.00	-.21	.27	-.25	-.19	-.09	.08
	SBSOD	-.34*	-.17	.03	-.20	-.01	-.37*	-.24	.10	-.09	-.19	-	

Table 3: Correlations between neuro-cognitive assessments, self-reported measurements of sense of direction and direct spatial learning according to the type of environment and the age group.

(a) Mini Mental State Examination, Folstein et al. 1975 ; (b) The Mental Rotation Test, Vandenberg & Kuse, 1978 ; (c) DSC: Digit Symbol coding test, WAIS-R subtest, Wechsler, 1981; (d) Corsi subtest of Wechsler Memory Scale-III, Wechsler, 1997; (e) Wechsler Visual Reproduction Test of Wechsler Memory Scale-III, Wechsler, 1997; (f) Visual recognition of Benton, Benton 1965; (g) Trail Masking Test, part B, Reitan,1992; (h) Porteus Maze Test, Porteus, 1950; (i) Raven’s Matrices Test standard, Raven et al. 2003; (j) the Santa Barbara Sense of Direction Scale, Hegarty et al. 2002.

In the older subjects, the wayfinding errors under VE conditions as direct navigation scores were correlated with the MMSE score [$r=-.73$; $p<.01$]. Also, a marginal correlation was observed between the wayfinding stops and the memory measurement (i.e., Visual Reproduction Test of Wechsler Memory Scale-III) [$r=-.45$ $p<.08$]. For the VR conditions, the wayfinding errors were significantly related with a memory measurement (i.e., the Benton test) [$r=-.53$ $p<.03$] and with an executive measurement (i.e., TMT) [$r=.51$ $p<.04$].

DISCUSSION

Few studies have actually compared the age-related differences in navigation and spatial learning tasks according to the real vs. virtual-laboratory environment manipulation (Kalová et al. 2005; Cushman et al. 2008). Additionally, no study has yet addressed the issue of an aging effect on the relationships between direct and self-reported navigation behavior according to the real vs. virtual-laboratory environment manipulation. Also, the age changes in the relationships between the direct and the self-reported navigation performance have not currently been investigated in the light of the mediating effect of aging decline on spatial abilities, on memory or on executive functioning. The present results give some insights into these issues.

Age-related differences in direct navigation measurement and self-reported navigation performance.

First, age-related differences were obtained in wayfinding performance. Furthermore, despite the performance superiority in real-world over virtual-laboratory conditions, the magnitude of age-related differences was not significantly increased in the virtual-laboratory condition compared to the real one, as previously shown by Kalová et al. (2005) and Cushman et al. (2008). The present results were also consistent with previous studies in realistic virtual environments, where participants had either to navigate toward different targets from several positions (Foreman et al., 2005;; Head & Isom, 2010; Kalia et al., 2008; Iaria et al., 2009) or repeat previously learned routes (Jansen, et al., 2010; Head & Isom, 2010; Taillade et al., in preparation). Overall, the use of virtual environment tests has not artificially boosted the age differences even if such tests yielded lower navigation performances compared to real test conditions in young as well as in older adults. This supports the use of virtual environment testing to detect aging decline in navigational capacities, with the caveat that virtual environment testing yields somewhat lower scores in all groups.

Similarly, age-related differences were also found in the spatial learning tasks assessing route and survey spatial knowledge, supporting the view that aging affects the acquisition processes of route and survey knowledge of large-scale spaces (see Moffat, 2009 ; Klencklen, Deprès & Dufour 2012; for review of similar results). Also, spatial learning and age-related differences relative to route as well as survey knowledge measurements were not different for real and virtual environment conditions. Therefore, the age-related differences in spatial learning of naturalistic environments from VR based media mirrored nearly completely those of learning resulting from direct experience.

Taken together, these first results clearly indicated that age-related differences are significantly observed in direct navigation tests closely resembling everyday life situations. These differences are observable irrespective of the test conditions (real vs. virtual). Also, strong age differences are observed on more abstract paper-pencil tasks that explored

spatial learning in real- or virtual-world test conditions. Hence, from a statistical point of view, it was difficult to support the view of De Beni et al. (2006) by which adequate or nearly normal performance is observable in elderly people in everyday tasks. Besides, it remains that the age-related decline is lower in naturalistic navigation tasks (it never exceeded 15% of the error percentage) than in paper-pencil tests (average age-related differences in the *map drawing* task and in the photo classification task, respectively: 14.7 points and 23.0 points of age-related difference). So, the naturalistic navigation difficulties of the elderly in large-scale environments were well below those of their spatial learning failures assessed by paper-pencil laboratory tasks. Also, the paper-pencil laboratory tasks assessing spatial learning were not sensitive to the manipulation of real vs. Virtual environment tests, contrary to the direct naturalistic navigation tasks. Hence, from this point of view, the present results agree with the claim by De Beni et al. (2006) and, more generally, they might suggest that the older adults are able to implement adaptive navigation strategies for route-recall based tasks in order to minimize, without eliminating, the negative aging effects on spatial learning and more particularly in real-world test conditions. For instance, to perform well in our wayfinding task based on a route-recall, they might focus on the memorization of direction changes within the route rather than the details of the scene or the survey route layout in the environment. So, different compensatory navigation strategies might be practiced by older adults in everyday contexts to increase the reliability of their navigation behavior.

Secondly, the older adults had similar scores to young adults on the SBSOD providing self-reported measurements of everyday navigation. This is in accordance with our previous study (Taillade et al., 2012) and others (Kirasic et al. 1992, Burns, 1999; Baroni & De Beni, 1995; De Beni et al., 2006) that have used different self-reported navigation measurement methods such as the Skelton questionnaire (Skelton et al., 2000). So, the absence of age difference in self-reported navigation performance is consistent across the studies as well as across the various self-reported navigation scales. To conclude that there is a metacognitive decline with age is still premature given that earlier results showed real but minor age differences in naturalistic navigation tests. Indeed, if age-related changes in navigation are minor in everyday situations, they are thus likely to be difficult to detect with the consequence of rendering monitoring and awareness more difficult. To elucidate the issue of possible age changes in the awareness of everyday navigation functioning, we have performed correlation analyses to capture their relationships within them, but also their relationships with spatial abilities, memory and executive functioning, bearing in mind the possible influences of the environment test factor, as suggested by Hegarty et al. (2006).

In summary, these first results supported that there are actually age differences in direct measurements of naturalistic navigation behavior, but they remained small compared to those observed in abstract paper-pencil tasks assessing spatial learning (in terms of survey and route knowledge). Also, elderly adults did not differ from young adults in their self-reporting of everyday navigation, suggesting some underestimation of navigation difficulties by elderly adults.

Cognitive mediators of Relationships between direct and self-reported navigational performance in the young and the elderly.

With regard to young participants, the overall results from correlation analyses fitted with those described by Hegarty et al. (2006). First, their self-reported navigation performance assessed by the SBSOD score was well correlated with the mental rotation scores as a

measure of spatial abilities. Secondly, some measures of spatial abilities (including the mental rotation processes studied by MRT and the visuo-spatial processing speed assessed by the code test) were significantly better correlated with learning from the naturalistic environment from VR media than with learning from direct experience, whereas the self-reported sense of direction (SBSOB score) was relatively well correlated with learning from direct experience rather than from VR based media. Taken together, this supported the conclusion that young adults base their ratings of their navigation behavior on an awareness of their real spatial abilities as well as on their real navigation performance, given that their self-ratings correlate with MRT and visuo-spatial processing speed (Hegarty et al., 2006; De Beni et al., 2006; Taillade et al., 2012), but also with direct navigation performance in a real-world task (Hegarty et al., 2006; De Beni et al., 2006; Taillade et al., in preparation).

Regarding older participants, cognitive measurements relative to both executive and memory functioning were significantly better correlated with navigation performance obtained under virtual device test conditions than those obtained under real-world conditions. So, the main mediating role of executive and memory functioning in the age-related differences on navigation tasks performed in virtual laboratory-based studies is still reported here (Taillade et al., 2012; for review, see Moffat, 2009; Wolbers & Hegarty, 2010). Most importantly, the association with spatial abilities was not observable in older adults. In addition, the best cognitive correlates of navigation performance in real-world test conditions were with the general cognitive functioning measurement (MMSE score) followed by the memory performance (marginal correlation with WMR3 score). The lack of association with spatial abilities suggested that the older subjects' navigation behavior is not significantly based on their spatial abilities. This tendency not to use spatial abilities to perform the navigation tasks may explain why the age differences are not significantly increased in virtual test conditions compared to real-world test conditions (as here and as previously shown by Kalovà et al., 2005; Cushman, et al., 2008) since the former is generally accepted as being more demanding of spatial abilities than the latter (as given by the correlation pattern for young subjects reported here and previously by Hegarty et al., 2006). One explanation could be that, as older people have many years of experience in orienting themselves in environments, they could have developed a generally higher navigation expertise (i.e., semantic and procedural skills) compared with younger people, reducing the role of spatial abilities in their navigation behavior. This interpretation is reinforced by the discrepancy observed in cognitive correlates of navigation performance in respect of real vs. virtual test conditions. Indeed, the older adults' navigation performance in real test conditions is more related to their general cognitive functioning and less to their actual memory performance (i.e., marginal correlation with WSM3). Thus, the navigation task in real-world walking situations is performed in older adults by reducing the involvement of cognitive processes that are known to be more resource demanding, such as the spatial abilities related to working memory functions (i.e., mental rotation processes, De Beni, et al., 2006 ; Dollinger, 1995; Armstrong & Cloud, 1998, Morganti, et al., 2009) or executive functioning (i.e., perceptual speed, Miyake et al., 2000; Braver & West, 2008) which are known to demand more effortful processes. By contrast, in virtual-laboratory test situations that are more abstract and less likely to require the support of expert navigation knowledge, the cognitive correlates of navigation performance involved more strongly memory functioning measures (i.e., Benton test) but also executive flexibility measures (i.e., TMT). This lends support to the previous idea that the minor age-related differences in navigation performance are due to the belief that older individuals would be more likely to rely on their

navigation expertise as a means of achieving the navigation task (De Beni, et al., 2006). Such an adjustment could be most noticeable in a real-world situation, where it has been developed and experienced, probably with positive feedback, by elderly adults.

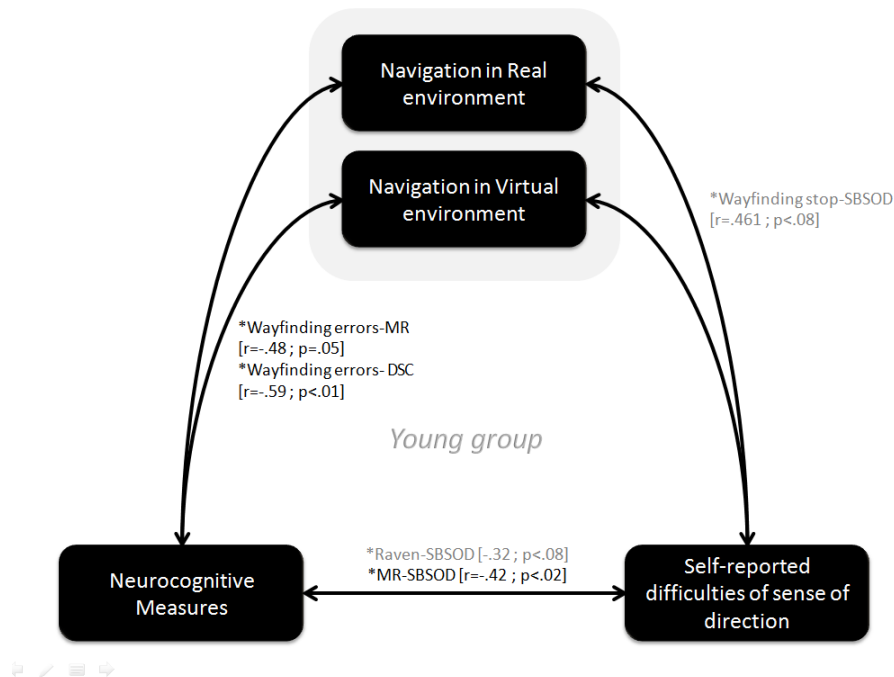


Figure 5: Summary of correlation analyses for young group

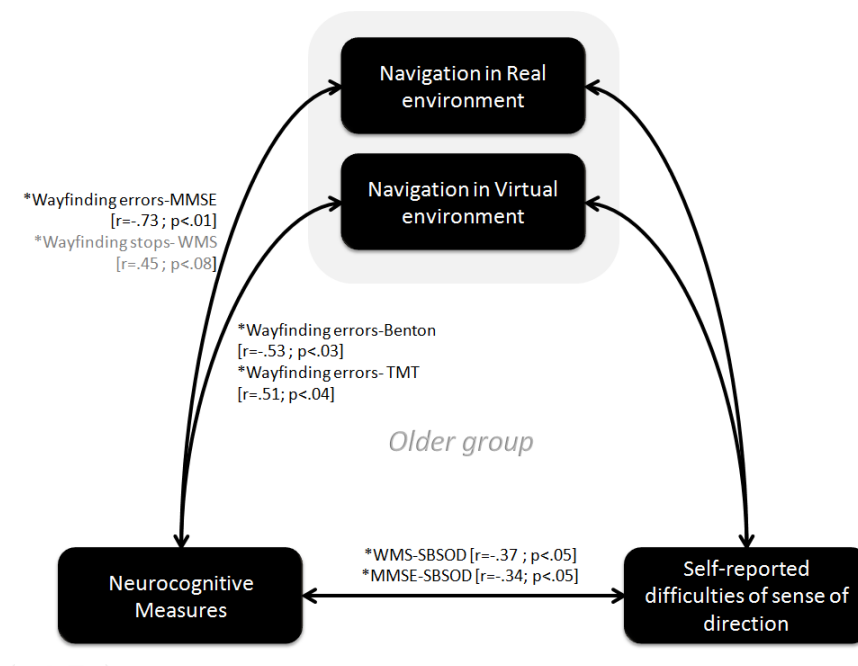


Figure 6: Summary of correlation analyses for older group

Importantly, the older adults' self-reported navigation performance was not significantly correlated with their actual navigation performance observed in both real-world test conditions and in virtual ones. These results were in accordance with the two previous laboratory-based studies that have also failed to find a significant relationship between direct and self-reported navigation performance in older adults (Taillade et al., in preparation; Kirasic, Allen, & Haggerty, 1992). They added that this lack of relationships with

aging is also noticed even when the direct navigation scores are collected in real-world test conditions. So, contrary to the situation in memory domains where, for elderly people, a (modest) correlation between memory beliefs and performance (e.g., Bolla, Lindgren, Bonaccorsy, & Bleeker, 1991; Hertzog and Hultsch., 2000), and a more strong correlation for naturalistic tasks compared to laboratory tasks (West, Dennehey-Basile, & Norris, 1996), a negative finding is observable for navigation and spatial orientation domains. One possible explanation could be that the magnitude of age-related differences in navigation performance (i.e., as seen previously) has little negative effect on elderly adults' everyday life compared with the magnitude in other cognitive domains such as the memory, and this discrepancy might decrease older people's ability to become fully aware of certain of their problems with navigation activities. This interpretation means that older adults have some difficulty in the executive monitoring of subtle navigation incidents in everyday situations (similar interpretation is advanced in the memory domain, Carter & Dunning, 2008).

Several explanations can be offered for why older adults do not judge accurately their performance on navigation tests, notably in regards to cognitive correlates of self-reported navigation performance. First, contrary to results from De Beni et al., (2006), a lack of correspondence is observable between the navigation self-ratings and the spatial abilities test performance. Instead, their self-reporting was significantly correlated to both their actual memory performance (subtests from WMS-3) and their actual general cognitive functioning (MMSE score). The inconsistency with results from the study by De Beni could be understood in the light of several facts. First, these authors used other self-estimates (those from the Scale on Sense of Direction and Spatial Representation (SDSR Scale); (Pazzaglia, Cornoldi, & De Beni, 2000), but they have also correlated separately each self-estimate of the SDSR with the MRT scores, while here the SBSOD scale is used in terms of global scores for an overall picture of self-reported navigation difficulties in everyday situations. Secondly, in their study, only one correlation with MRT was shared for young and for older adults, and it concerned the spatial survey sub-scale of self-estimates with r values dropping with age (respectively, $r = 0.31$, $p = 0.005$; $r = 0.24$, $p = 0.04$). These observations stress that the relation between self-reported navigation performance and spatial abilities becomes very tenuous with age or is even largely lost, as shown in our present results. This also agrees with the observation in older adults of a lack of correlation between direct navigation measurements and spatial abilities. Forgoing the use of spatial abilities (probably in favor of using acquired navigation knowledge) for achieving the navigation task may explain why, for older adults, they based their rating on other known facets of their cognitive functioning rather than on their spatial abilities. Consistent with this, other cognitive correlates of subjective measurements of navigation performance in older adults are found and, further, they are those of their actual navigation performance in real-world situations. As a result, the absence of a relationship between self-reported navigation ability and real navigation or spatial abilities performance was substituted by the correlations with decline in memory and general cognitive functioning, and this decline was also correlated with real navigation performance in both cases. Therefore, contrary to the situation with young adults, older adults do not base their ratings on an awareness of their navigation performance nor on that of their spatial abilities. On the contrary, older adults appeared to base their ratings more on awareness of their actual memory abilities as well as on their actual general cognitive functioning. In others words, there could occur a shift with aging where the accurate self-estimates of young adults stem from judgments based specifically and accurately on the spatial abilities, while the under-estimations of navigation difficulties in elderly subjects stem

from judgments not specifically based on their spatial abilities but more on transversal cognitive abilities such as their memory functioning and their general cognitive functioning. Note that Skelton et al. (2000) have already reported in brain traumatic injury populations this type of significant correlation between memory performance (assessed with the Rivermead Behavioural Memory Task) and self-reported navigation difficulties ($r = -.73$). Several reasons can be offered for why the older adults' self-estimations are based on their actual memory and general cognitive functioning rather than on their real navigation performance or spatial abilities.

First, for recall, the actual age-related differences are minor in navigation behavior, so they may be missed when monitoring older individuals. Obviously, the unawareness of navigation incidents in everyday life, in turn, might contribute to an optimistic appraisal of one's own navigation functioning. Complementary to this line, one major source of error in self-reports of navigation functioning could be related to the self-schema view (Hertzog, 2002). In metamemory domain, several aging studies have shown that the weakening of the relationship between the memory self-reporting and the actual performance is strongly due to influences of age-related stereotypes and more particularly relative to memory or cognitive aging decline (for an overview, Hertzog and Dunlosky, 2011). If older individuals corrected their navigation self-perceptions more according to age-related stereotypes, such as the belief that mental capacity unavoidably declines with age, this may explain why their self-reporting is not related to their real navigation behavior or their spatial abilities but instead is related to their awareness of their actual memory and general cognitive functioning.

Taken together, the results and explanations might indicate that by promoting their good navigation experiences and by ignoring their more subtle difficulties, older adults continue in everyday life to feel highly confident in their ability to cope with navigation tasks and consequently perceive themselves as having a good sense of direction and navigation skills, but their confidence crumbles when they become aware of their decline in memory and general cognitive functioning.

Finally, it needs to be added that the characteristics (e.g., mood, self-esteem) of the older adults could be a source of self-estimation error (Sedikides & Gregg, 2008; Campbell & Sedikides, 1999). A bias can occur because of a person's general tendency to be self-enhancing and to defend him/herself against criticism (see Ackermann & Wolman, 2007; Sedikides & Gregg, 2008, for an overview). This judgmental bias, known as the self-serving bias effect, leads individuals to overestimate their abilities (Epley & Whitchurch, 2008). Similarly, older males and older females differ in the degree to which they exhibit self-serving bias (Campbell & Sedikides, 1999; Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012). Males are more self-serving than females, probably because men are higher on global self-esteem than women or because they have higher success expectations on cognitive functioning tasks. These gender differences could be more pronounced in spatial skills (De Beni et al., 2006).

In conclusion, minor but real age-related differences are observed in spatial navigation tasks while strong age-related differences are noted in laboratory tests exploring spatial learning relative to the distinction between survey-route knowledge. These age-related differences were not significantly sensitive to the manipulation of the test condition (real vs. virtual environments) supporting the use of a virtual device for studying the aging effect in navigation behavior. However its relevant use should keep in mind that the elderly subjects' navigation performance in a virtual device were correlated with their executive and memory

functioning while such correlations were less or even not observable for real-world performance. Probably, this reflects that elderly navigation behavior in everyday navigation could be more driven by their expert navigation knowledge rather than the effortful navigation processing.

Furthermore, elderly adults did not differ from young adults in their self-reporting relative to everyday navigation suggesting some underestimations of navigation difficulties by elderly adults, as previously shown. Main findings reported here provide insights on the changes with age in the relationships between self-reported and real navigation performance. First, for young adults, the correlations between the direct and the self-reported navigation performance depended on the real vs. virtual-laboratory test manipulation while no correlation was observed for older adults. Secondly, it is reported that changes in correlation between navigation beliefs and performance with aging are widely due to changes in their cognitive correlates. Contrary to the case in young adults, the self-estimation of navigation performance by older adults is not specifically based on the actual navigation performance or spatial abilities, but only on their general cognitive and memory functioning. We have assumed that wide navigation experiences gained across a longer life span allow probably to cope with lesser spatial abilities for achieving navigation tasks, but the navigation difficulties awareness in older adults renders them, in turn, less accurate in basing their self-perceptions only on their own general cognitive decline. Additional research is needed to fully understand and support this assumption. Finally, the present results have implications for future research on metacognition and aging in the navigation and the spatial cognition domain. For example, important questions remain open about the role that metacognition has in explaining age-related changes in different cognitive abilities and the potential progression from normal to pathological forms of cognitive decline. Indeed, as the inability to recognize one's own cognitive deficits is usually considered to be a symptom of pathological aging (Clare, 2004; Cosentino, Metcalfe, Butterfield, & Stern, 2007), a better understanding of the loss with aging of relationships between subjective and direct performance should be a critical focus of future studies.

BIBLIOGRAPHY

Ackermann, P. L., & Wolman, S. D. (2007). Determinants and validity of self-estimates of abilities and self-concept measures. *Journal of Experimental Psychology*, 13, 57–78.

Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D., & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17, 125–143.

Armstrong, C. L., & Cloud, B. (1998). The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal aging. *Neuropsychology*, 12 (2), pp. 208-217

Baroni, M. R., & De Beni, R. (1995). Ricordo e descrizione di percorsi negli anziani. Effetti delle modalita` di presentazione e delle differenze individuali./Memory and route description in the elderly. Effects of modality of stimulus material presentation and of individual differences. *Ricerche di Psicologia*, 19, 183–211.

Benton, A. (1965). Manuel pour l'application du test de rétention visuelle. Applications cliniques et expérimentales, 2e édition. Centre de Psychologie Appliquée, Paris.

Bolla KI, Lindgren KN, Bonaccorsy C, et al. Memory complaints in older adults. *Arch Neurol* 1991 ; 48 : 61-4.

Braver, T. S. & West, R. (2008). Working memory, executive control and aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): *Handbook of aging and cognition, 3rd ed.*, (pp. 311-372). New York: Psychology Press.

Burns, P.C., (1999). Navigation and the mobility of older drivers. *The Journals of Gerontology: Series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 54, S49–S55.

Campbell, W. K., & Sedikides, C. (1999). Self-threat magnifies the self-serving bias: A meta-analytic integration. *Review of General Psychology*, 3, 23–43.

Carter, T. J., & Dunning, D. (2008). Faulty self-assessment: Why evaluating one's own competence is an intrinsically difficult task. *Social and Personality Psychology Compass*, 2, 346-360.

Chua, EF, Schacter DL, Sperling RA. 2009. Neural correlates of metamemory: A comparison of feeling-of-knowing and retrospective confidence judgments. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 21:1751-1765.

Clare, L. (2004). The construction of awareness in early-stage Alzheimer's disease: A review of concepts and models. *British Journal of Clinical Psychology*, 43, 155–175. *Cognitive Sciences*, 14, 138–146.

Cosentino, S. A., Metcalfe, J., Butterfield, B., & Stern, Y. (2007). Objective metamemory testing captures awareness of deficit in Alzheimer's disease. *Cortex*, 43, 1004–1019

Cushman, L. A., Stein, K., & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71, 888–895.

De Beni, R., Pazzaglia, F. & Gardini, S., (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: when age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology* 20, 807–821.

Dollinger, S. M. C. (1995). Mental rotation performance: age, sex, and visual field differences. *Developmental Neuropsychology*, 11, 215–222.

Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W.M., Baumgartner, R. N., Sutherland, R. J., (2003). The aging hippocampus: cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex* 13, 1344–1351.

Epley, N., & Whitchurch, E. (2008). Mirror, mirror on the wall: Enhancement in self recognition. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 34, 1159–1170.

- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician". *Journal of psychiatric research*, 12(3), 189-198.
- Head, D., & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209, 49–58.
- Hegarty, M., Richardson, A.E., Montello, D.R., Lovelace, K., Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30, 425-447.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T. & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Hertzog, C., & Dunlosky, J. (2011). Metacognition in later adulthood: Spared monitoring can benefit older adults' self-regulation. *Current Directions in Psychological Science*, 20, 167-173.
- Hertzog, C., & Hultsch, D. F. (2000). Metacognition in adulthood and old age. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *Handbook of Aging and Cognition* (2nd ed., pp. 417–466). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196, 187–191.
- Jansen, P., Schmelter, A., & Heil, M. (2010). Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Experimental Psychology*, 57, 54–60.
- Kalia, A. A., Legge, G. E., & Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with nongeometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, 37, 1677–1699.
- Kalova, E., Vlcek, K., Jarolimova, E., Bures, J., (2005). Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: corresponding results in real space tests and computer tests. *Behavioural Brain Research*, 159, 175-189.
- Kennedy, R.S., Berbaum, K.S., Drexler, J. (1994). Methodological and measurement issues for the identification of engineering features contributing to virtual reality sickness. *Paper presented at: Image 7 Conference*.
- Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: Implications for learning new environments. *Psychology and Aging*, 6, 10–18.
- Kirasic, K. C., Allen, G. L., & Haggerty, D. (1992). Age-related differences in adults' macrospatial cognitive processes. *Experimental Aging Research*, 18, 33–39

- Kirasic, K.C., 1989. The effects of age and environmental familiarity on adults' spatial problem-solving performance: evidence of a hometown advantage. *Experimental Aging Research* 15, 181–187.
- Klatzky RL, Loomis JM, Beall AC, Chance SE, Golledge RG. (1998). Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. *Psychological Science*; 9(4), 293–298.
- Klencklen, G., Després, O., Dufour, A., (2012). What do we know about aging and spatial cognition? Reviews and perspectives. *Ageing Research Reviews*, 11, 123-135.
- Lapeyre, B., Hourlier, S., Servantie, X., N'Kaoua, B., & Sauzéon, H. (2011). Using the landmark-route-survey framework to evaluate spatial knowledge obtained from synthetic vision systems. *Human Factors*, 53, 647–661.
- Lipman, P. D. & Caplan, L. J. (1992). Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram, *Psychology and Aging*, 7, 435-442.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31, 557–564.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging*, 20, 683–694.
- Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B., & Fernández, G. (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage*, 22, 1503–1514.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, A.H., Howerter, S. & Wager, T.D. (2000) The unity and diversity of executive functions and their contribution to complex « frontal lobe » tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100.
- Moffat, S. D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19, 478–489.
- Moffat, S. D., & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience*, 116, 851–859.
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, 27, 965–972.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, 787–796.

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

Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer’s disease: The remembrance of things passed. *Neurology*, 61, 1491–1497.

Morganti, F., Marrakchi, S., Urban, P.P., Iannocari, G.A., Riva, G. (2009). A virtual reality based tool for the assessment of “survey to route” spatial organization ability in elderly population: preliminary data. *Cognitive Processing*, 10(2), 257-259.

Newman, M. C., & Kaszniak, A. W. (2000). Performance on a Human Analog of the Morris Water Maze. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7, 86–93.

Pazzaglia F, Cornoldi C, De Beni R (2000) Differenze individuali nella rappresentazione dello spazio: Presentazione di un questionario autovalutativo [Individual differences in spatial representation and in orientation ability: Presentation of a self-report questionnaire]. *Giornale Italiano di Psicologia*, 3, 627–650

Plancher, G., Gyselinck, V., Nicolas, S., & Piolino, P. (2010). Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology*, 24, 379–390

Porteus, S. D. (1950). *The Porteus Maze Test and intelligence*. Palo Alto, CA: Pacific Books.

Rabbit, P., Maylor, E., McInnes, L., Bent, N., & Moore, B. (1995). What goods can self-assessment questionnaires deliver for cognitive gerontology? *Applied Cognitive Psychology*, 9, 127–152.

Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.

Rhodes, M. G., & Kelley, C. M. (2005). Executive processes, memory accuracy, and memory monitoring: An aging and individual differences analysis. *Journal of Memory and Language*, 52, 578-594.

Sedikides, C., & Green, J. D. (2004). What I don’t recall can’t hurt me: Information negativity versus information inconsistency as determinants of memorial self-defense. *Social Cognition*, 22, 4–29.

Siegel, A.W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In H. W. Reese (Ed.), *Advances in child development and behavior* (Vol. 10, pp. 9–55). New York, NY: Academic Press.

Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: The relationship in older adults. *Psychology and Aging*, 7, 389–394.

- Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *22*, 157–175.
- Souchay, C., Moulin, C.J.A., Clarys, D., Taconnat, L., Isingrini, M. (2007). Diminished episodic memory awareness in older adults: evidence from feeling knowing and recollection. *Consciousness and Cognition*, *16*(4), 769-84.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Déjos, M., Arvind-Pala, Larrue, F., Wallet, G., Gross, C., N’Kaoua, B. (2012). Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, In press.
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, *47*, 599–604.
- Vanderhill, S., Hultsch, D. F., Hunter, M. A., & Strauss, E. (2010). Self-reported cognitive inconsistency in older adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *17*, 385–405.
- Volz-Sidiropoulou, E., Gauggel, S. (2012). Do Subjective Measures of Attention and Memory Predict Actual Performance? Metacognition in Older Couples. *Psychology and Aging*, *27*(2), 440-450.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N’Kaoua, B. (2011). Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *14*, 417–423.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject’s strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, *6*, 572–574.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N’Kaoua, B. (2010). Virtual/real transfer of spatial learning: Impact of activity according to the retention delay. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, *8*, 115–118.
- Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. New York, NY: Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (1997). *WAIS-III Administration and Scoring Manual*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- West, R. L., Dennehey-Basile, D., & Norris, M. P. (1996). Memory self-evaluation: The effects of age and experience. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *3*, 67–83.

Willis, S.L, 1991. Cognition and everyday competence. *Annual Review of Gerontology and Geriatrics* 1, 80–109.

Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 138-146.

Chapitre VI: Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application

Taillade, M., Sauzéon, H., Dejos, M., Arvind Pala, P., Larrue F., Wallet, G., Gross, C. & N'Kaoua B. (2012).

(Article publié dans *Aging, Neuropsychology, and Cognition*)

Abstract

The aim of this study was to evaluate in large-scale spaces wayfinding and spatial learning difficulties for older adults in relation to the executive and memory decline associated with aging.

We compared virtual reality (VR)-based wayfinding and spatial memory performances between young and older adults. Wayfinding and spatial memory performances were correlated with classical measures of executive and visuo-spatial memory functions, but also with self-reported estimates of wayfinding difficulties.

We obtained a significant effect of age on wayfinding performances but not on spatial memory performances. The overall correlations showed significant correlations between the wayfinding performances and the classical measures of both executive and visuo-spatial memory, but only when the age factor was not partialled out. Also, older adults underestimated their wayfinding difficulties. A significant relationship between the wayfinding performances and self-reported wayfinding difficulty estimates is found, but only when the age effect was partialled out.

These results show that, even when older adults have an equivalent spatial knowledge to young adults, they had greater difficulties with the wayfinding task, supporting an executive decline view in age-related wayfinding difficulties. However, the correlation results are in favor of both the memory and executive decline views as mediators of age-related differences in wayfinding performances. This is discussed in terms of the relationships between memory and executive functioning in wayfinding task orchestration. Our results also favor the use of objective assessments of everyday navigation difficulties in virtual applications, instead of self-reported questionnaires, since older adults showed difficulties in estimating their everyday wayfinding problems.

Key words: Wayfinding, Spatial Memory, Cognitive Aging, Executive Functioning, Memory, Virtual Reality

It is well known that elderly people have some difficulties in their ability to navigate in their environment as well as in spatial learning and memory (for review, Moffat, 2009). Spatial learning and navigation ability are very important for everyday functioning, and their role in the problems experienced by the elderly is generally underestimated. In addition, older individuals have self-perceived deficits in navigation that have an impact on their mobility (Burns, 1998). Yet, few aging studies have addressed the relationships between the self-perceived deficits in navigation and the spatial learning and wayfinding performances. The development of virtual reality (VR) applications and their design adapted to the needs of older users provides the possibility to assess navigation behavior in naturalistic and controlled situations (Loomis, Blascovich, & Beall, 1999). The aim of this study was to evaluate the effect of cognitive aging on navigational abilities using a VR application, and to study its connections to measures of executive functioning, memory and everyday navigation difficulties.

Wayfinding has been described as a purposeful, directed, and motivated movement from an origin to a specific distant destination, which cannot be directly perceived by the traveler (Golledge, 1999). The ultimate goal of human wayfinding is to find the way from one place to another. The traveler must be able “to achieve a specific destination within the confines of pertinent spatial or temporal constraints and despite the uncertainties that exist” (Allen, 1999; p. 47). Wayfinding requires solving problems that involve explicit decision making, selecting routes to take, orienting toward imperceptible landmarks and planning trips and trip sequences, using different levels of spatial knowledge (Landmark, Route and/or Survey¹⁰) and environmental cues (Allen, 1999; Montello & Sas, 2006; Wolbers & Hegarty, 2010). Hence, wayfinding should be considered to involve some aspects of planning, based on spatial knowledge acquired from the explored environments (Allen, 1999; Wiener, Büchner, & Hölscher, 2009; Wolbers & Hegarty, 2010).

Numerous studies exploring the neural correlates of spatial learning and navigation in humans show that spatial navigation and learning involves a large network of structures, including the parahippocampal gyrus, prefrontal, parietal and retrosplenial cortices (for a review, see Spiers & Maguire, 2007; Burgess, 2008). In a model proposed by Byrne, Becker, & Burgess (2007), the hippocampus and temporal lobe provide a long-term *allocentric representation* of space (i.e., also called *survey representation*), the parietal lobes provide an egocentric representation of space; and the retrosplenial cortex and parieto-occipital sulcus allow for an interaction between the two (also see Spiers & Maguire, 2007; Burgess, 2008). Also, prefrontal cortex activations are found in relation with goal proximity (Spiers & Maguire, 2007), or with the planning and the monitoring processes during navigation (Spiers, 2008). So, wayfinding may be sensitive to frontal as well as to hippocampal functions (Burgess, 2008; Spiers, 2008; Wolbers & Hegarty, 2010).

An age-related decline is widely reported in spatial memory performances in large-scale spaces (for review, see Moffat, 2009). For example, a decline was reported in a human version of the Morris Water Maze by Newman & Kaszniak (2000), as well as in virtual analogs of this maze (e.g., Antonova et al., 2009; Moffat & Resnick, 2002; for review, see Moffat, 2009). In more ecological tasks, age-related difficulties were found in memory for landmarks after navigation in real environments (e.g., Monacelli, Cushman, Kavcic, & Duffy, 2003), which were confirmed with virtual environments (Cushman, Stein, & Duffy, 2008; Head & Isom, 2010; Jansen, Schmelter, & Heil, 2010). Route memory difficulties were found in laboratory-based studies using series of pictures (Lipman & Caplan, 1992), and after navigation in real environments (e.g., Monacelli et al., 2003). These difficulties were

¹⁰ The development of spatial knowledge has been described in three stages, Landmark acquisition preceding Route, and Survey knowledge: i) Landmark knowledge represents the identity of discrete objects or scenes that are salient and recognizable in the environment; ii) Route knowledge consists of sequences of landmarks and associated decisions; iii) Survey knowledge, also called “Cognitive Map” is a map-like and allocentric representation of spaces (Montello, 1998; Siegel & White, 1975; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982).

reproduced in virtual mazes composed of hallways (e.g., Head & Isom, 2010; Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001) or in more realistic environments (virtual house: Meulenbroek, Petersson, Voermans, Weber, & Fernández, 2004; virtual town: Head & Isom, 2010; Plancher, Gyselinck, Nicolas, & Piolino, 2010; virtual hospital: Cushman et al., 2008). Difficulties for the acquisition of survey representations from navigation in real environments was also found (Kirasic, 1991; Simon, Walsh, Regnier, & Krauss, 1992) and replicated in virtual applications (virtual mazes composed of hallways: Jansen et al., 2010; Head & Isom, 2010; Moffat, Elkins, & Resnick, 2006; virtual district: Iaria, Palermo, Committeri, & Barton, 2009; virtual buildings; Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger, & Lindenberger, 2005). Only Foreman, Stanton-Fraser, Wilson, Duffy, & Parnell (2005) found no significant differences between young and old adults in a pointing task, in a transfer from virtual to real paradigm study. From these results, it is possible to assume that the elderly exhibit a spatial learning decline, affecting all the level of spatial representations, whatever the dimension and the type of environment.

Very few studies have specifically examined the wayfinding performances of older adults. In regards to virtual reality based studies, three studies have investigated age differences in navigation tasks within a Virtual Environment (VE) (Iaria et al., 2009; Head & Isom, 2010; Lövdén et al., 2005), while two others have investigated age differences in navigation tasks that require the use and transfer of spatial knowledge acquired in a VE to perform a navigation task under real conditions (Kalia et al., 2008; Foreman et al., 2005). Using a virtual district, Iaria et al. (2009) showed age-related differences in the speed of learning the topography of the environment, but also in wayfinding performances (i.e., reaching for the targeted landmarks). Head & Isom (2010) used a virtual maze to show age effects in a wayfinding task, as well as in locating targets, recalling landmarks, and recognizing environmental scenes. Lövdén et al. (2005) assessed navigation performances using a virtual museum, in which participants had to learn its configuration in order to be able to find a specific position in the virtual museum itself (wayfinding test) or to place pictures of landmarks on a map (assessing spatial knowledge). Age differences were obtained in both tests, supporting a decline in spatial learning and wayfinding abilities with aging. Foreman et al. (2005) studied the transfer of spatial knowledge from a virtual shopping mall to its real version. They used map drawing, pointing, and wayfinding tasks toward invisible targets in the real shopping mall as recall tasks, after four learning sessions in the virtual mall. Their results showed age-related differences in the wayfinding task but not in the pointing or map drawing task. Similar findings have been reported by Kalia et al. (2008) using a photorealistic VE. This suggests that the transfer of spatial knowledge from real to virtual environments is possible in older adults, and that despite good spatial representations, older adults had wayfinding difficulties. Although these results provide a sense of optimism concerning the real navigational capabilities of elderly subjects, they must be interpreted with caution. First, the authors only reported measures strongly related to memory (i.e., target localization accuracy), and did not include any measures assessing the efficiency of the planned routes (direction errors, time to choose directions, route length, time required to find the targets, etc). Second, the size of the VE used is relatively small (a building with one level and a few hallways), and the lack of difficulty might not be sufficient enough to distinguish between the performances of the younger and older adults.

Few studies examined the relation between classical executive and memory functioning, and wayfinding performances. On a wayfinding task, where participants explored a real supermarket with a list of items to purchase, Kirasic (2000) assessed the relationship between mental spatial abilities, spatial layout learning measures (route execution task, scene recognition task, distance ranking task, map placement task), measures of wayfinding behavior (route execution, walking and head movements) and aging. They showed that the

relationship between age and wayfinding behavior was mediated in its entirety by the spatial layout learning factor. However, their spatial ability factor contained very different cognitive measures: some of them were really measures of spatial abilities with spatial visualization (i.e., the Surface Development Test; Ekstrom, French, & Harman, 1976), perceptual speed (i.e., the Hidden Figures Test, the Gestalt Completion Test; Ekstrom et al. 1976), and spatial relations (i.e., the Card rotation test by Krauss, 1989). Other measures of their spatial factor seem related to other cognitive functions such as long-term memory (i.e., the Building Memory Test by Ekstrom et al., 1976), that assesses the ability to remember the configuration, location, and orientation of figural stimuli) or executive function (i.e., the Map Planning Test by Ekstrom et al., 1976). It is probably for this reason that Kirasic (2000) concluded that even if an “age-related decline in learning environmental layout plays a major role in the age differences in wayfinding, other variables not assessed in the study also play a significant role.” Hence, it is possible that in real conditions, age-related navigation difficulties are the result of declines affecting executive/frontal and the spatial learning/hippocampal functions (likely related to aging changes in these neural structures, see the meta-analysis by Raz, 2000). Additionally, several findings support relationships between age-related alterations of cerebral volume and structural integrity, spatial memory and navigation performances in virtual environments. The decline in spatial learning performances in older subjects is often reported as related to hippocampal and frontal modifications (Driscoll et al., 2003; Meulenbroek et al. 2004; Moffat, et al. 2006; Moffat, Kennedy, Rodrigue, & Raz, 2007; Antonova et al., 2009). Importantly, Moffat et al. (2007) reported that spatial performances were closely related to speed of processing, executive and memory cognitive measures, leading them to propose that both executive/frontal and hippocampal/memory decline play a role in age-related spatial navigation performances. Yet it must still be established whether the age-related spatial memory and navigation difficulties observed in VR-designed studies can be better explained by the executive/frontal and or memory/hippocampal decline associated with aging.

Therefore, the aim of this study was to investigate age differences in measures of wayfinding and spatial memory performances from a large scale VE and then to establish their relationships with measures of executive/frontal and visuo-spatial memory/hippocampal functions. In addition, the relation between self-estimates of wayfinding and object memory difficulties, and wayfinding and spatial memory performances will be studied in order to control the ecological validity of our applications and the ability of older adults to report their difficulties (Loomis et al., 1999).

Method

Participants: The participants were 23 young healthy adults (mean age = 22.87; SD = 2.8) and 24 older adults (mean age = 64.75; SD = 3.18). All of the participants were volunteers, native French speakers and right-handed. From a general questionnaire, they reported that they were healthy and without any visual, neurological or psychiatric disorders. This self-assessment procedure, although it may be limitative, was designed to not lengthen the experiment duration (which was already long with the virtual experiment and the neurocognitive assessment). Young adults were recruited at the University of Bordeaux Segalen and the older adults were recruited from a Senior University in Bordeaux ("Université du Temps Libre"). Older adults were tested with the Mattis Dementia Rating Scale as an exclusion test (exclusion for a score < 129). All of the subjects had to complete a French version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ, Kennedy, Berbaum, & Drexler, 1994) immediately after the learning phase in the VE. This questionnaire measures

the severity of sickness induced by 3D simulators¹. Participants also had to rate their New Technology (NTIC) experience with computers and computer games (Moffat et al., 2001)². The French adaptation of the Mill Hill Vocabulary Scale (Deltour, 1993) and the Forward Corsi Span Test of the WMS-III (Wechsler Memory Scale-III; Wechsler, 1997) were also administered. This latter test was used to complete the Mattis scale in the assessment of short-term memory for the older subjects. The Mattis scale provides digit span measures while the Corsi test provides a visual-spatial memory span measure that is more relevant as a memory span measure for spatial memory investigations.

There were no significant inter-group differences in education level ($p > .60$) or for the Forward Corsi Span Test ($p > .10$). So, the scores for the older and young adults on the SSQ were not significantly different ($p > .80$). Young adults had a higher NTIC score than the older adults ($p < .0001$) but a lower score on the Mill Hill Vocabulary Test ($p < .0001$). The characteristics of the subjects for each group are presented in Table 1.

Table 1: Characteristics of the participants

	Young group (mean \pm SD)	Older group (mean \pm SD)	t (45)
N	23	24	
Age	22,87 (2,80)	64,75 (3,18)	-47,836****
Education Level	15,65 (2,14)	16,00 (2,67)	-0,491
Mill Hill Vocabulary Test	23,70 (3,70)	28,79 (2,82)	-5,321****
Corsi Span Test	8,65 (1,97)	7,87 (1,98)	1,347
NTIC Test	15,35 (4,79)	9,42 (3,70)	4,76****
SSQ	142,75 (168,06)	154,20 (258,39)	-0,179

Note: **** = $p < .0001$, using a Student's t -test.

-Neuro-cognitive Assessment- Several neuropsychological tests were administered to each participant to estimate their cognitive functioning, assessing two main cognitive domains: visuo-spatial memory (VS-M) and visuo-spatial and executive functioning (VS-EF). In addition, participants completed questionnaires about their everyday visuo-spatial difficulties (EVSD) with two sub-scores relative to wayfinding and object memory complaints, respectively. These tests were administered before and after the trainings and the learning test in VR, and their order was counter-balanced between subjects.

- *VS memory (VS-M)*: The Visual Reproduction Test, including immediate and delayed free recall and recognition tasks, from the Wechsler Memory Scale-III (WMS-III, Wechsler, 1997) was used. Correlation analyses, partialled out for the age factor (the age variable was coded as a categorical: young = 1; old = 2), indicated strong relationships between these scores (Table 2).

- *Visuo-Spatial Executive functioning (VS-EF)*: The VS-EF evaluation included *mental rotation abilities* (i.e., The Mental Rotation Test (MRT) by Vandenberg & Kuse, 1978), *processing speed* with the Digit Symbol-Coding (DSC, subtest from WAIS-R, Wechsler, 1981), *working memory* with the Backward Corsi Span Test (BCS) of the WMS-III, *cognitive flexibility* with the part B of the Trail Making Test (TMT B, Reitan, 1992), *inductive*

¹ The questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered under three factors: Oculomotor, Nausea and Dizziness. Symptoms were associated with presence/absence and with their degree of severity. Answers were scored 0 for "absence" of symptoms, 1 for "mild" symptoms, 2 for "present" and 3 for "severe." Weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy et al. (1994).

² This includes three items that were rated from 0 to 7; the maximum score was 21 for each participant.

reasoning abilities with Raven's Matrices Test (standard form; Raven, Raven, & Court, 2003) and *planning abilities* with the Porteus Maze Test (Porteus, 1950).

-*Everyday Visuo-Spatial Difficulties (EVSD)*: were assessed with the Spatial Orientation questionnaire (wayfinding and object memory subscores; Skelton, Bukach, Laurance, Thomas, & Jacobs, 2000).

-*VR-based Material and Procedure*- All of the material and procedures are derived from previous studies demonstrating the relevance of VR-based applications to study spatial learning (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, & N'Kaoua, 2008; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2009; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'Kaoua, 2010; Wallet, Sauzéon, Pala, Larrue, & N'Kaoua, 2011). The virtual environment (VE) was a replica of the district near Bordeaux's hospital. It was created using the Virtools© software. Significant landmarks (signpost, sign, and urban furniture) were included in the VE. The participants used a joystick to control their movements in the VE and carried out instructions given by the experimenter. The apparatus used in the virtual reality room was a Dell© personal computer (3GHz, 5 Gb RAM) with a NVIDIA© Quadro FX 4400 graphics card, a F1+ © projector, a 2 x 1.88 meter screen and a Thrustmaster joystick for exploration.

The procedure was divided into three steps as follows: (1) a training phase (15 minutes), where each participant was trained to navigate in an unused part of the VE, to allow the participants to be familiarized with the virtual navigation and joystick use and to confirm that none of the participants had major simulator sickness (mostly for the older adults); (2) a learning phase (15 minutes), where the participants learned a route in the virtual environment, which was 787 meters long, and composed of 9 streets, 13 intersections and 11 direction changes; (3) and a restitution phase, where two kinds of tasks were performed by the participants after a 10 minute retention interval.

- *Wayfinding task*: In the second step, participants were asked to replicate the route that they learned in the VE in the real Bordeaux district. To this end, the participant was brought to the starting point in the real district which corresponded to the virtual one, and had to recall the path. Wrong turns and stops before deciding to change directions (when the subject stops more than five seconds and looks around) were counted. When a mistake occurred after a stop, both were counted. If the subject made a wrong decision, he was shown the correct direction by the experimenter and continued on the route. Thus, two scores were calculated from this task: the number of direction errors (wrong turns) and the number of stops during the wayfinding task, as a probe of the use of spatial representation to perform a navigational task (Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre, Hourlier, Servantie, N'Kaoua, & Sauzéon, 2011).

- *Spatial Memory tasks*: In the third step, participants underwent two tasks. The first was a map drawing task, known to be well performed when participants have developed a good spatial cognitive map of the environment (Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre et al., 2011): the subject has to draw the route learned in the VE on a blank sheet of paper. The drawing had to be made of connected segments, representing the linear locomotion and direction changes. The score is the number of correct directions given from the beginning of the path. The maximum score is 11. The second was a picture classification task, known to be well performed when participants have well-developed route knowledge of the performed path (Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011; Lapeyre et al., 2011): the goal of this task was to chronologically order 12 pictures that corresponded to different points of views of the district encountered along the route. The score is a sequence score: 1 point is given if the photo position corresponds to the correct position in the overall sequence and half of a point is given if the position is incorrect but near a picture that immediately follows with respect to the chronological order. The maximum score is 12. From the above descriptions, the picture classification and map drawing tasks were used as a probe of "route" and "survey"

representations, respectively. The orders of the tasks were counterbalanced between the subjects.

Results

- Neuro-Cognitive Assessment / Everyday Visuo-Spatial Difficulties Relationships and Age-differences-

Correlation analyses partialled out for the age factor indicated moderate relationships between the BCS Test, TMT B and Raven's Matrices Test, but not with the MRT, the DSC, and the Porteus Maze Test (Table 2). Also, a significant correlation between the two subscores of the EVSD questionnaire was obtained (Table 2).

This set of partial correlation analyses also revealed few significant correlations between the VS-M scores and VS-EF scores (Table 2). In addition, the EVSD scores were correlated with several VS-EF measures as follows: the wayfinding subscore of the Skelton questionnaire was negatively correlated with the Raven's Matrices Test as well as the Porteus Maze Test, while the object memory subscore was correlated with the Raven Matrices Test and the TMT-B scores (Table 2). Thus, these results indicate a negative relationship between the EVSD scores and VS-EF abilities: the higher the scores, the lower the abilities.

Table 2: Correlations partialled out for age between the VS-M, VS-EF and EDVD scores

	VS-M			VS-EF						EVSD	
	1.IR	2.DR	3.Rec	4.MRT	5.BCS	6.TMT B	7.Raven	8.DSC	9.Porteus	10. Wfg	11. OM
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.	0,54****	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.	0,53****	0,41**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	0,21	0,17	0,29*	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	0,30*	0,27	0,45**	0,23	-	-	-	-	-	-	-
6.	-0,19	-0,04	-0,27	-0,06	-0,32*	-	-	-	-	-	-
7.	0,18	0,19	0,24	0,18	0,45**	-0,36*	-	-	-	-	-
8.	0,09	0,37*	0,26	0,05	0,2	-0,33*	0,16	-	-	-	-
9.	0,15	0,01	-0,03	-0,01	0,01	-0,13	0,26	0,07	-	-	-
10.	-0,23	-0,27	-0,09	-0,14	-0,19	0,26	-0,49***	-0,07	-0,34*	-	-
11.	-0,2	0,12	-0,07	0,09	-0,2	0,33*	-0,33*	-0,16	-0,1	0,48**	-

Notes: VS-M = Visuo-spatial Memory; IR = Immediate Recall of the WMS-III; DR = Delayed Recall of the WMS-III; Rec: Recognition test of the WMS-III; VS-EF = Visuo-spatial and executive functioning; MRT = Mental Rotation Test; BCS = Backward Corsi Span Test of the WMS-III; Raven = Raven's Matrices Tests; DSC = Digit Symbol Coding of the WAIS-R, Porteus = Porteus Maze (Age Test). EVSD = Everyday Spatial Difficulties; Wfg: Wayfinding subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); OM = Object Memory subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); ****p < .0001; ***p < .001; **p < .01; *p < .05.

Significant age-related differences were found for all of the visuo-spatial memory measures as well as for those of executive functioning (except for the Porteus Maze performances) (Table 3). By contrast, the younger adults reported more difficulties than the older adults in the Skelton wayfinding subscore ($p < .05$), but no age effect was found for the Skelton object memory subscore ($p = .65$) (Table 2). Thus, interestingly, older participants did not perform as well as their younger counterparts, as seen by the VS-M scores, but the younger and older participants did not differ on the object memory complaint measure. By contrast, age-related differences were mostly significant on the VS-EF measures, but the older participants reported surprisingly lower wayfinding difficulties compared to the younger participants.

Two separate analyses were carried out. The first was an analysis of age differences on VR-based spatial learning performances. Age differences between the conditions were tested in an

analysis of variance (ANOVA) (made up of two age groups) that used the following within-subject dependent variables: the number of direction errors (wayfinding task), the number of stops (wayfinding task), the picture classification scores and the sketch-map scores. The second analysis examined the effects of age on the correlations between each one of the VR-based spatial learning performances and neuro-cognitive scores in terms of VS-M, VS-EF and EVSD. Two sets of correlation analyses were managed with the Bravais-Pearson procedure. The first one comprised correlations of all the participants and the second was the same, with the age variable partialled out. The age variable was coded as a categorical variable (young = 1, old = 2) (Taconnat, Clarys, Vanneste, Bouazzaoui, & Isingrini, 2007).

Table 3: Participant's scores on the Neurocognitive Assessments and Questionnaires

	Variables	Young group (mean ± SD)	Older group (mean ± SD)	t (45)
VS-M	WMS 3 - Immediate Recall	96,22 (7,76)	87,83 (10,70)	3,06**
	WMS 3 - Delayed Recall	91,13 (10,7)	67,17 (22,93)	4,56****
	WMS 3 - Recognition	46,26 (1,66)	43,62 (3,13)	3,58***
VS-EF	Mental Rotation Test	17,87 (8,35)	9,71 (6,35)	3,78***
	Digit Symbol Coding Test	69,48 (10,31)	46 (11,92)	7,21****
	Backward Corsi Span Test	8,52 (1,85)	7,33 (1,52)	2,4*
	TMT B	48,55 (19,83)	64,33 (19,72)	-2,74**
	Raven's Matrices	54,96 (3,8)	47,79 (4,22)	6,1****
	Porteus Maze Age Test	22,85 (2,79)	21,23 (3,49)	1,75
EVSD	Skelton Wayfinding Score	28,04 (14,14)	19,17 (11,95)	2,33*
	Skelton Object Memory Score	19,17 (11,94)	19,42 (7,71)	-0,46

Notes. *p < .05; **p < .01; ***p < .001; ****p < .0001 (using the Student's t-test).

-VR-based Performances-

Age related differences in VR-based spatial learning tasks:

The two age groups were compared using the Student's t-test procedure for the virtual spatial navigation and memory measures.

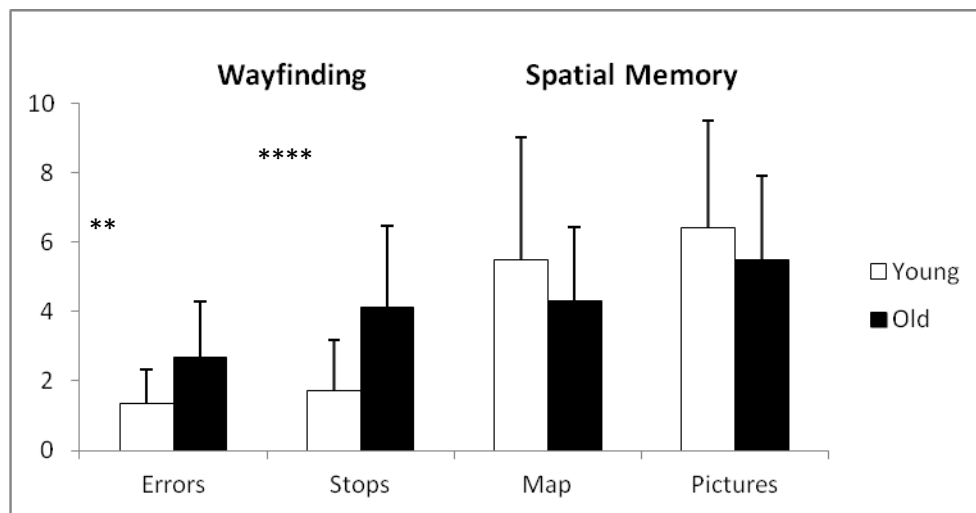
- For the *wayfinding* task, the older group made significantly more errors [(t(45) = -3.49; p < .01)] and stops [(t(45) = -4.17; p < .0001)] than the young group (Figure 1).
- For the *spatial memory* tasks, there were no significant differences for the map drawing (p > .300) and picture classification measures (p > .900) (Figure 1).

Relationships between VR-based performances and neuro-cognitive scores (VS-M, VS-EF and EVSD), (Tables 4a and 4b):

Concerning the VS-M measures, wayfinding errors were negatively correlated only with the recognition test of the WMS-III (r = -0.43, p < .01). When the age factor was partialled out, this correlation was not significant (r = -0.27, p > .06). Wayfinding stops were negatively correlated in the Immediate Recall Test of the WMS-III (r = -0.35, p < .05), the Delayed Recall Test of the WMS-III (r = -0.46, p < .01) and the Recognition Test of the WMS-III (r = -0.42, p < .01). When the age factor was partialled out, these correlations became insignificant (respectively, p > .200, p > .100 and p > .100).

Neither the map drawing task nor the picture classification tasks were significantly correlated with any of the VS-M measures.

Figure 1: VR-based Wayfinding (number of errors and stops) and Spatial Memory (Map: sketch drawing score; Pictures: pictures classification score) performances for the young and older groups.



Notes: ** $p < .01$, **** $p < .0001$.

For VS-EF measures, the wayfinding errors were significantly correlated with the Mental Rotation Test ($r = -0.33$, $p < .05$), the Backward Corsi Span Test ($r = -0.32$, $p < .05$), the TMT B ($r = 0.40$, $p < .01$), the Raven's Matrices Test ($r = -0.54$, $p < .0001$) and the Digit Symbol Coding Test ($r = -0.36$, $p < .05$). When the age factor was partialled out, only the correlation with the Raven's Matrices remained significant ($r = -0.35$, $p < .05$). Wayfinding stops were significantly correlated with the Mental Rotation Test ($r = -0.29$, $p < .05$), the Backward Corsi Span Test ($r = -0.42$, $p < .01$), the TMT part B ($r = 0.32$, $p < .05$), the Raven's Matrices Tests ($r = -0.53$, $p < .0001$) and the Digit Symbol Coding Test ($r = -0.39$, $p < .01$). When age was partialled out, only the correlation with the Backward Corsi Span Test remained significant ($r = -0.35$, $p < .05$).

Tables 4a: Correlations between the VR-based spatial learning tasks and neuro-cognitive scores (VS-M, VS-EF and EVSD).

		VS-M			VS-EF				EVSD			
		IR	DR	Rec	MRT	<u>BCS</u>	TMT B	Raven	DSC	Porteus	Wfg	OM
Wfg VR	Errors	-0,21	-0,25	-0,43**	-0,33*	-0,32*	0,40**	-0,54****	-0,36*	-0,13	0,06	0,27
	Stops	-0,35*	-0,46**	-0,42**	-0,29*	-0,42**	0,32*	-0,53****	-0,39**	-0,23	0,08	0,29*
Sp M VR	Map	0,21	0,15	0,26	0,21	0,17	-0,27	0,22	0,04	0,18	-0,02	0,03
	Pictures	0,07	0,11	0,16	0,27	0,28	-0,28	0,35*	0,03	-0,02	-0,2	-0,17

Notes: Wfg VR = VR based on the wayfinding task, Sp M VR = VR based the Spatial Memory tasks; VS-M = Visuo-spatial Memory; IR = Immediate Recall of the WMS-III; DR = Delayed Recall of the WMS-III; Rec = Recognition test of the WMS-III; VS-EF = Visuo-spatial and executive functioning; MRT = Mental Rotation Test; BCS = Backward Corsi Span Test of the WMS-III; Raven = Raven's Matrices Test; DSC = Digit Symbol Coding of the WAIS-R, Porteus = Porteus Maze(Age Test). EVSD = Everyday Spatial Difficulties; Wfg = Wayfinding subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); OM = Object Memory subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); **** $p < .0001$; ** $p < .01$; * $p < .05$.

Tables 4b: Correlations partialled out for age between the VR-based spatial learning tasks and neuro-cognitive score (VS-M, VS-EF and EVSD).

		VS-M				VS-EF				EVSD		
		IR	DR	Rec	MRT	BCS	TMT B	Raven	DSC	Porteus	Wfg	OM
Wfg VR	Errors	-0,02	0,02	-0,27	-0,14	-0,19	0,27	-0,35*	-0,04	-0,02	0,25	0,27
	Stops	-0,17	-0,23	-0,23	-0,04	-0,31*	0,16	-0,29	0	-0,12	0,32*	0,29*
Sp M	Map	0,14	0,04	0,19	0,13	0,11	-0,21	0,11	-0,16	0,14	-0,1	0,04
VR	Pictures	-0,01	0,02	0,09	0,21	0,23	-0,23	0,32*	-0,14	-0,06	-0,28*	-0,16

Notes: Wfg VR = VR-based wayfinding task, Sp M VR = VR-based Spatial Memory tasks; VS-M = Visuo-spatial Memory; IR = Immediate Recall of the WMS-III; DR = Delayed Recall of the WMS-III; Rec = Recognition test of the WMS-III; VS-EF = Visuo-spatial and executive functioning; MRT = Mental Rotation Test; BCS = Backward Corsi Span Test of the WMS-III; Raven = Raven's Matrices Test; DSC = Digit Symbol Coding of the WAIS-R, Porteus = Porteus Maze (Age Test). EVSD = Everyday Spatial Difficulties; Wfg = Wayfinding subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); OM = Object Memory subscore of the Spatial Orientation questionnaire from Skelton et al. (2000); * $p < .05$.

The map drawing task was not significantly correlated with any of the VS-EF measures, even after age was partialled out. By contrast, the picture classification task was correlated with the Raven's Matrices Test ($r = 0.35$, $p < .05$), even after age was partialled out ($r = 0.32$, $p < .05$). With regards to the EVSD measures, wayfinding errors were not correlated with the Skelton wayfinding subscore ($p > .600$) or with the Skelton object memory subscore ($p > .06$). When the age factor was partialled out, the correlation with the Skelton wayfinding subscore was still not significant ($p > .09$), and neither was the Skelton object memory subscore ($p > .07$). Wayfinding stops were not significantly correlated with the Skelton wayfinding subscore ($r = 0.08$, $p > .500$); however, this correlation was significant when the age factor was partialled out ($r = 0.32$, $p < .05$). Wayfinding stops were also correlated with the Skelton object memory subscore ($r = 0.29$, $p < .05$) even after age was partialled out ($r = 0.29$, $p < .05$). Finally, the map drawing task was not correlated with the Skelton wayfinding or object memory subscores, even after the age factor was partialled out. By contrast, the picture classification task was not correlated with either Skelton subscore, but was significantly correlated after age was partialled out ($r = -0.28$, $p < .05$).

Discussion

The aim of this study was to investigate age differences in measures of wayfinding and spatial knowledge in a virtual-to-real transfer task, and then to establish their relationships with measures of executive/frontal and spatial memory/hippocampal functions.

Age related differences in VR-based performances

First, age-related differences were obtained in wayfinding performances, in line with previous studies in realistic virtual environments, where participants had to either navigate toward different targets from several positions (Foreman et al., 2005; Lövdén, et al., 2005; Head & Isom, 2010; Kalia et al., 2008; Iaria et al., 2009) or repeat previously learned routes (Jansen, et al., 2010; Head & Isom, 2010). As the older and young adults had similar results on the VR-based spatial memory tasks, the age-related differences in wayfinding abilities observed in our study are likely not due to poor route and survey spatial knowledge. Using a virtual-to-real transfer task, Foreman et al. (2005) did not find any age effects on a pointing task (estimating the direction of invisible targets) or map drawing task, but observed differences in their wayfinding task (reaching several invisible targets by navigation). However, age-related differences are widely observed in various spatial memory tasks, supporting that there is a decline of acquisition processes of route and survey knowledge of large-scale spaces, probably in relation to senescence lesions in the temporal lobe (Moffat, 2009). This inconsistency

concerning the abilities of older adults to develop good spatial representation could be resolved by analyzing methodological choices to investigate age differences in developing spatial representations. All of the studies cited above were not transfer tasks, contrary to the study carried out by Foreman et al. (2005) and our study, which found no age-related differences. During the transfer task, the participants who were exposed to the virtual environment (i.e., learning phase) also performed a wayfinding task in the real environment (i.e., recall phase). It is well known that the repeated exposure to many materials induces learning effects that are particularly beneficial for elderly adults (Sauzéon, Claverie, & N’Kaoua, 2006; Taconnat et al., 2007). This means that older adults continued to acquire and develop spatial representations even when performing the wayfinding task in the real environment, while the young participants developed spatial representations when they performed the wayfinding task. Thus, the procedural design of spatial learning transfer from virtual to real environments may be particularly beneficial for elderly adults in order to compensate for their primary difficulties in developing an elaborate spatial representation of large-scale environments. Consequently, it is not excluded that wayfinding difficulties observed in older adults are due to age-related decline in spatial memory. This latter assumption is investigated by analyzing the effect of age on the relationships between the wayfinding performances and neuro-cognitive measures, depending on the frontal/executive and hippocampal/memory distinction.

Relationship between the wayfinding performances and neuro-cognitive measures

The VR-based wayfinding performances were correlated with all of the visuo-spatial memory (VS-M) measures and almost all of the visuo-spatial executive functioning (VS-EF) measures. When the age factor was partialled out, correlations between the VR-based wayfinding performances and all of the VS-M and executive functioning measures became insignificant, except for the working memory (BCS) and inductive reasoning (Raven’s Matrices) measures¹¹. Therefore, it was shown that wayfinding difficulties in naturalistic environments due to aging are related to both executive and memory difficulties as reported in few studies (for review, see Moffat, 2009; Wolbers & Hegarty, 2010). By extension, these results fit with neuro-imagery findings showing an age-related difference in spatial memory performances related to functional or structural modifications in the hippocampal, parahippocampal and prefrontal cortices (Antonova et al., 2009; Moffat et al., 2007).

The relationship between wayfinding difficulties and both memory and executive age-related differences suggests several additional explanations. First, as supposed above, after exposure to a VE, elderly adults might not be able to form spatial representations, thus making it necessary to encode spatial information, even when performing the wayfinding task. Thus, while navigating, elderly adults had to simultaneously encode new spatial information and retrieve previously acquired spatial knowledge in order to control and plan their navigation. When older adults performed the wayfinding task, they probably placed a priority on forming spatial representations and therefore, the navigation control and planning related processes were a second priority, thereby resulting in a decline in the wayfinding scores. This may explain the significant correlation between the wayfinding scores and VS memory measures. Second, it is well known that aging affects executive functioning (for a review, see Braver & West, 2008), which plays a crucial role in performing a dual task (eg., Holtzer, Stern, & Rakitin, 2005). Consequently, the simultaneous process of encoding and retrieving spatial information in order to use it for path planning or navigation monitoring (path progression, spatial updating, etc.) may also have exceeded the older adults’ executive capacities, making it more difficult for them to perform the wayfinding task. This assumption

¹¹ This relationship between the wayfinding performances and classical measures of working memory and reasoning confirmed the crucial role of working memory (Spiers, 2008) and problem solving processes (Rainville, Passini & Marchand, 2001) in navigation performances.

had also been supported by the findings of Iaria et al. (2009) where, despite a good representation of the environment, older adults had wayfinding difficulties. Another outcome of age-related executive decline could be the prioritization with aging of walking control over the cognitive processes involved in wayfinding tasks (encoding, retrieval, planning, and/or spatial updating), as already demonstrated in multi-tasking condition involving simultaneous walking and cognitive activities (e.g., Lövdén et al., 2005; Li, Lindenberger, Freund, & Baltes, 2001). Prioritization in multi-task conditions is seen as a behavioral compensatory response in older adults to manage their reduced cognitive resources across multiple tasks (e.g., Riediger, Li, & Lindenberger, 2006). In our case, prioritization (due to reduced cognitive resources) toward walking control could affect spatial encoding and retrieval and/or the planning and monitoring of navigation, and thereby could explain the relationship between wayfinding difficulties and both executive and memory decline. Further studies should address this issue. For example, in a real environment, a walking condition could be compared to a wheelchair condition (in which the direction changes are verbally controlled by the subjects) in order to minimize the motor processes involved in the wayfinding task. An age effect diminished or even cancelled under wheelchair conditions compared to walking conditions, will give evidence of significant role of walking control on the age-related wayfinding decline with regards to the transfer of spatial learning from virtual to real environments.

Taken together, these assumptions indicate that the wayfinding difficulties observed in virtual-real transfer procedures originate from age-related failures in the complex orchestration of processes required to perform the navigation task, such as the interactions between the memory and executive processes, but also between cognitive and sensorimotor processes. Further studies are required to better understand age-related differences in wayfinding performances. VR-based studies using a virtual-real transfer procedure will be especially appropriate in order to challenge these age-related research questions. The virtual-real transfer procedure enables the manipulation of processes involved in the development of spatial representations (e.g., view type; richness of spatial cues; Wallet et al., 2011), as well as the degree of body engagement during the learning phase, based on locomotion metaphor manipulation (e.g., treadmill vs. joystick) (for review, Chrastil & Warren, 2012). Therefore, this procedure enables the selective capture of cognitive and sensorimotor processes in order to develop spatial representations and thus their influence on subsequent wayfinding tasks.

Relationship between the wayfinding performances and everyday spatial difficulties

Unexpectedly, self-estimates of everyday wayfinding difficulties were higher in the young adults compared to the older adults. Furthermore, there was no correlation between the subjective self-reported wayfinding difficulties. However, as expected, when the age factor was partialled out, there was a positive correlation between the self-reported wayfinding difficulties and the direct performances on the wayfinding tasks (i.e., stops). This suggests that the relationships between self-reported wayfinding skills and wayfinding performances are degraded by the age factor.

Note that age-related decrease of self-reported wayfinding difficulties is not consistent with studies showing an increase in self-reported difficulties, particularly in driving situations (e.g., Burns, 1998, Turano et al., 2009). However, Kirasic, Allen, & Haggerty (1992) reported similar results to ours. The age related change in the relationship between the self-estimated and direct wayfinding performances suggests that cognitive aging affects the ability of participants to effectively report their own difficulties in walking situations, probably due to age-related meta-cognitive difficulties (Vanderhill, Hultsch, Hunter, & Strauss, 2010). Further studies should address the aging inconsistencies between walking and driving situations. Most likely, the driving activity demands higher cognitive resources (because of having to detect road signs and other cars, speed, etc.) due to driving situations (environment familiarity, visibility, traffic, time constraints,

correcting trajectories, etc.). Also, wayfinding difficulties could have an impact on driving safety (Burns, 1998), probably increasing the older adults' awareness of their wayfinding difficulties. Similarly, the correlation between self-reported wayfinding difficulties and VR-based route memory measures (picture classification scores) was significant only when the age factor was partialled out. Such a correlation was not found with survey or allocentric memory, as assessed by the sketch-map task. This is in line with the results by Simon et al. (1992), who reported a correlation between measures of spatial knowledge (assessed by a landmark positioning task on a map) and everyday wayfinding performances (assessed by their "Neighborhood Use" questionnaire). This supports that route knowledge is sufficient to implement a successful wayfinding strategy when individuals possess little or no survey knowledge of an area (Meilinger, Hölscher, Büchner, & Brösamle, 2007; Wiener et al., 2009). Nevertheless, the mediating effect of age disrupts this relationship as the probable result of aging of executive decline on spatial memory. Also, the relationship between self-reported everyday difficulties in remembering the position of objects and VR-based wayfinding stops remained significant, irrespective of the age factor. The wayfinding stops can be seen as pauses before decision making, which are required to retrieve or search spatial cues (trees, road signs, etc), to link them to previously acquired actions, to infer directions and to execute the action (Spiers & Maguire, 2008). So, the self-reported difficulties to remember objects in both young and older adults could be related to the need of pauses to retrieve spatial cues before making a decision.

Importantly, the correlation between the wayfinding performance and self-reported wayfinding difficulties supports the ecological validity of the cognitive assessment provided by VR applications (Loomis et al., 1999). In addition, the lack of a correlation between self-reported and direct wayfinding measures with age indicates that direct measures (based on realistic VR applications) should be preferred over self-reporting questionnaires for accurately assessing everyday wayfinding difficulties in older adults. This is especially relevant in light of the older adults' overestimation of their wayfinding abilities in walking situations.

To conclude, this study is the first to provide behavioral-based evidence showing that age-related wayfinding difficulties are mediated by both executive and memory factors. In addition, we showed that these difficulties are strongly underestimated in older adults, suggesting meta-cognitive inabilities with age to report everyday walking navigation problems. This strongly supports the use of objective evaluations of wayfinding performances instead of self-questionnaires in order to assess ambulatory navigation abilities. As assumed, further investigations should address the role of prioritization of walking over cognitive processes to give new insights into age-related wayfinding decrease, as well as on the distorted self-estimation of wayfinding abilities with increasing age. Finally, this approach reinforces the small body of studies that have highlighted the senescence of hippocampal and the prefrontal regions as the main neural correlates of navigation decline with aging.

References

- Allen, G. (1999). Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding: Bases for individual differences in spatial cognition and behavior. In R. G., Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes* (pp. 46-80). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D., & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17 (2), 125-143.
- Braver, T. S. & West, R. (2008). Working memory, executive control and aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): *Handbook of aging and cognition*, 3rd ed., (pp. 311-372). New York: Psychology Press.

- Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, 77-97.
- Burns, P. C. (1998). Wayfinding Errors While Driving. *Journal of Environmental Psychology*, 18 (2), 209-217.
- Byrne, P., Becker, S., & Burgess, N. (2007). Remembering the past and imagining the future: A neural model of spatial memory and imagery. *Psychological Review*, 114 (2), 340-375.
- Chrastil, E. R & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 19 (1), 1-23.
- Cushman, L. A., Stein, K., & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71 (12), 888-895.
- Deltour, J. J. (1993). Echelle de vocabulaire de Mill Hill de J. C. Raven. Adaptation française et normes européennes du Mill Hill et du Standard Progressive Matrices de Raven (PM 38) [Mill-Hill vocabulary scale of J. C. Raven. French adaptation and European norms]. *Braine-le-Chateau, Belgium: Editions L'application des techniques modernes*.
- Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W. M., Baumgartner, R. N., & Sutherland (2003). The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex*, (13), 1344-1351.
- Ekstrom, R. B., French, J. W., & Harman, H. H. (1976). *Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests*. Princeton, NJ: Educational Testing Service.
- Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*, 37 (2), 275-292.
- Golledge, R. G. (1999). Human wayfinding and cognitive maps. In R. G. Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*, (pp. 5-45). Baltimore, MD: Johns Hopkins Press.
- Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209 (1), 49-58.
- Holtzer, R., Stern, Y., & Rakitin, B. C. (2005). Predicting age-related dual-task effects with individual differences on neuropsychological tests. *Neuropsychology*, 19 (1), 18-27.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196 (2), 187-191.
- Jansen, P., Schmelter, A., & Heil, M. (2010). Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Experimental Psychology*, 57 (1), 54-60.

- Kalia, A. A., Legge, G. E., & Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception, 37* (11), 1677-1699.
- Kennedy, R. S., Berbaum, K. S., & Drexler, J. (1994). Methodological and measurement issues for the identification of engineering features contributing to virtual reality sickness. *Paper presented at: Image 7 Conference.*
- Kirasic, K., C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychology and Aging, 6* (1), 10-18.
- Kirasic, K. C., Allen, G. L., & Haggerty, D. (1992). Age-related differences in adults' macrospatial cognitive processes. *Experimental Aging Research, 18* (1-2), 33-39.
- Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation, 2*, 117-134.
- Krauss, I. K. (1989). Testing Cognitive Skills with Playing Cards. In J. D. Sinott (Ed.), *Everyday Problem Solving: Theory and Applications* (pp. 238-250). New York: Praeger.
- Lapeyre, B., Hourlier, S., Servantie, X., N'Kaoua, B., & Sauzéon, H. (2011). Using the landmark-route-survey framework to evaluate spatial knowledge obtained from synthetic vision systems. *Human Factors, 53* (6), 647-661.
- Li, K. Z. H., Lindenberger, U., Freund, A. M., & Baltes, P. B. (2001). Walking while memorizing: Age-Related Differences in Compensatory Behavior. *Psychological Science, 12* (3), 230-237.
- Lipman, P. D. & Caplan, L. J. (1992). Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram, *Psychology and Aging, 7*, 435-442.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers, 31* (4), 557-564.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging, 20* (4), 683-694.
- Meilinger, T., Hölscher, C., Büchner, S., J., & Brösamle, M. (2007). How Much Information Do You Need? Schematic Maps in Wayfinding and Self Localisation. In T. Barkowsky et al. (Eds.): *Spatial Cognition V, LNAI 4387*, (pp. 381-400).
- Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B., & Fernández, G. (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage, 22* (4), 1503-1514.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging, 22* (5), 787-796.

- Moffat, S. D. & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience*, *116* (5), 851-859.
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, *27* (7), 965-972.
- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, *17* (6), 1274-1282.
- Moffat, S. D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, *19* (4), 478-489.
- Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's disease: The remembrance of things passed. *Neurology*, *61* (11), 1491-1497.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. In M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems* (pp. 143-154). New York: Oxford University Press.
- Montello, D. R., & Sas, C. (2006). Human factors of wayfinding in navigation. In W. Karwowski (Ed.), *International encyclopedia of ergonomics and human factors* (2nd ed., pp. 2003-2008). London: CRC Press/Taylor & Francis, Ltd.
- O'Keefe J. & Nadel L. (1978). *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Oxford University Press.
- Plancher, G., Gyselinck, V., Nicolas, S., & Piolino, P. (2010). Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology*, *24* (3), 379-390.
- Porteus, S. D. (1950). *The Porteus Maze Test and intelligence*. Palo Alto, CA: Pacific Books.
- Rainville, C., Passini, R., & Marchand, N. (2001). A multiple case study of wayfinding in dementia of the Alzheimer type: Decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *8* (1), 54-71.
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (2003). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 1: General Overview*. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.
- Raz, N., (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: integration of structural and functional findings. In: Craik, F.I.M., Salthouse, T. A. (Eds.). *The Handbook of Aging and Cognition-II*. Erlbaum (pp. 1-90), New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.

- Riediger, M., Li, S. C., & Lindenberger, U. (2006). Selection, optimization, and compensation (SOC) as developmental mechanisms of adaptive resource allocations: Review and preview. In J. E. Birren & K.W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging* (6th ed., pp. 289-313). Amsterdam: Elsevier.
- Sauzéon, H., Claverie, B., & N'Kaoua, B. (2006). Age differences in the organization and acquisition-forgetting processes in a multi-free-recall task. *In Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition* 18 (1). <http://cpl.revues.org/index1012.html>
- Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22 (2), 157-175.
- Siegel, A. W. & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In H. W., Reese (Ed.). *Advances in child development and behavior*, (Vol. 10, pp. 9-55). New York: Academic Press.
- Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychology and Aging*, 7 (3), 389-394.
- Spiers, H. J. & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, (17), 618-626.
- Spiers, H. J. (2008). Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia*, (46), 2106-2108.
- Taconnat, L., Clarys, D., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., & Isingrini, M. (2007). Aging and strategic retrieval in a cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. *Brain and Cognition*, 64 (1), 1-6.
- Turano, K. A., Munoz, B., Hassan, S. E., Duncan, D. D., Gower, E. W., Roche, K. B., Keay, L., Munro, C. A., & West, S. K. (2009). Poor sense of direction is associated with constricted driving space in older drivers. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, 64 (3), 348-355.
- Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization, *Perceptual and Motor Skills*, (47), 599-604.
- Vanderhill, S., Hultsch, D. F., Hunter, M. A., & Strauss, E. (2010). Self-reported cognitive inconsistency in older adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 17 (4), 385-405.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer: Effects of passive/active exploration mode in simple and complex routes for three different recall tasks. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, 175-178.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject's strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6 (4), 572-574.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2010). Virtual/real transfer of spatial learning: Impact of activity according to the retention delay. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 8 (1), 115-118.

Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng X., & N'Kaoua, B. (2011). Virtual/Real Transfer of Spatial Knowledge: Benefit from Visual Fidelity Provided in a Virtual Environment and Impact of Active Navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*. 14 (7-8), 417-23.

Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. Psychological Corporation, New York.

Wechsler, D. (1997). *WAIS-III Administration and Scoring Manual*. San Antonio: Psychological Corporation.

Wiener, J., Büchner, S., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, 9 (2), 1-14.

Wolbers, T. & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (3), 138-146.

Chapitre VII: Age-related wayfinding differences in naturalistic large-scale environments: Detrimental Motor controlling effects are mediated by executive and memory decline?

Taillade, M., Sauzéon, H., Larrue, F., Arvind Pala, P. & N'Kaoua, B.

(Article soumis à *PlosOne*)

Abstract :

Abstract : The aim of this study was to evaluate the motor control activity (active vs. passive condition) in large-scale spaces wayfinding and spatial learning difficulties for older adults in relation to the executive and memory decline associated with aging. We compared virtual reality (VR)-based wayfinding and spatial memory (survey and route knowledge) performances between 32 young and 32 older adults. A significant effect of age on wayfinding performances was obtained but not on spatial memory performances. The active condition has specially deteriorated the survey measure in all the participants and has increased age-related differences in wayfinding performances. The overall correlations showed significant correlations between the wayfinding performances and the classical measures of spatial abilities, executive and visuo-spatial memory, but only when the age factor was not partialled out. Most importantly, the increase of age-related differences in wayfinding performances after an active condition were related further widely to executive measures. All the results relative to detrimental effect of motor activity are discussed in terms of dual tasks effect as well as executive decline associated to aging.

Key-words: Aging; Motor-control activity; spatial learning and wayfinding.

It is well known that elderly people have some difficulties in their ability to navigate in large-scale environment with the consequence to reduce their everyday life mobility. Various cognitive factors have been identified as contributors to aging declines in navigation behaviors such as the hippocampal-memory factors relative to spatial learning, but also the fronto-executive factors relative to planning and execution of path (for review, Moffat, 2009; Klencken, Després, & Dufour, 2012). Another main reason of age-related navigation difficulties could be the cognitive prioritization with aging of motor control over the navigational cognitive processing, as already demonstrated in multi-tasking condition involving simultaneous walking and cognitive activities (e.g., Li, Lindenberger, Freund, & Baltes, 2001; Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger, & Lindenberger, 2005). Despite the fact that main aging research advances in spatial cognition are related to the use of virtual reality (VR) applications allowing the simulations of navigation behaviors in naturalistic and controlled situations (eg., Loomis, Blascovich, & Beall, 1999; Hegarty & Waller, 2005), none aging study has specially addressed the role that plays motor control for commanding interface in age-related differences occurring in spatial learning performances from naturalistic virtual large-scale environment. Yet, this issue is critical for VR design-aging studies and even more when the study scope is to promote the VR applications as spatial learning media or support for elderly. Hence, the aim of this study was to evaluate the effect of motor control command on spatial learning performed in virtual environment, by the study of the age-related differences in subsequent navigational and spatial memory tasks, and then to study their connections to measures of executive and memory functioning.

Large scale spatial abilities have been the focus of numerous VR based studies (Loomis, et al., 1999; Chrastil & Warren, 2012; Spiers & Maguire, 2007). Indeed, VR allows simulations of large scale 3D spaces and to overcome the lack of ecological validity of classical laboratory-based visuo-spatial tests (Hegarty & Waller, 2005; Lorenz & Neisser, 1986). Wayfinding is probably the more representative navigational behaviors in large-scale environments. It is classically described as a purposeful, directed, and motivated movement from an origin to a specific distant destination, which cannot be directly perceived by the traveler (Golledge, 1999). The ultimate goal of human wayfinding is to find the way from one place to another. The traveler must be able ‘to achieve a specific destination within the confines of pertinent spatial or temporal constraints and despite the uncertainties that exist’ (Allen, 1999, p. 47). Wayfinding is considered to involve some aspects of planning, based on spatial learning from the explored environments (Allen, 1999; Wiener, Büchner, & Hölscher, 2009; Wolbers & Hegarty, 2010; Taillade et al., 2012). The spatial learning can be defined as the acquisition processes of spatial knowledge in large scale spaces according to three stages (or levels of spatial knowledge) in reference to Siegel & White’ model (1976), with: (1) the “landmarks” (local salient objects) level acquired first, followed by (2) the “route” (sequence of places and decisions) and, finally by (3) the “survey” knowledge (also called configurationnal or directional knowledge). Originally described as sequential processing, recent findings have shown that survey knowledge can be early achieved, depending on people’s sense of direction (Montello, 1998; Ishikawa & Montello, 2006; Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa, & Lovelace, 2006). A large body of studies in this domain indicates that spatial learning and navigation are complex activities, depending on memory, executive, small scale visuospatial abilities (Hegarty et al., 2006; Ishikawa, & Lovelace, 2006; Wolbers & Hegarty, 2010). Also, spatial navigation and learning are demonstrated to involve a large network of structures, including the parahippocampal gyrus, prefrontal, parietal and retrosplenial cortices (for a review, see Burgess, 2008; Spiers & Maguire, 2007). In a model proposed by Byrne, Becker, and Burgess (2007), the hippocampus and temporal lobe provide a long-term allocentric representation of space (i.e., also called survey representation), the parietal lobes provide an egocentric representation of space; and the retrosplenial cortex and

parieto-occipital sulcus allow for an interaction between the two (also see Burgess, 2008; Spiers & Maguire, 2007). Also, prefrontal cortex activations are found in relation with goal proximity (Spiers & Maguire, 2007), or with the planning and the monitoring processes during navigation (Spiers, 2008). So, wayfinding may be sensitive to frontal as well as to hippocampal functions (Burgess, 2008; Spiers, 2008; Wolbers & Hegarty, 2010).

Even if an age-related decline is widely reported in wayfinding performances, the decline is mostly observed in mazes-like environments, rather than in naturalistic large-scale spaces (for review, see Moffat, 2009; Kléncken et al., 2012). Indeed, only two studies have investigated age differences in navigation tasks within a virtual naturalistic environment (VE) (Iaria, Palermo, Committeri, & Barton, 2009; Lövdén et al., 2005), while three others have investigated age differences in navigation tasks that require the use and the transfer of spatial knowledge acquired in a VE to perform a navigation task under real conditions (Foreman, Stanton-Fraser, Wilson, Duffy, & Parnell, 2005; Kalia, Legge, & Giudice, 2008; Taillade et al., 2012). Using a virtual district, Iaria et al. (2009) showed age-related differences in the speed of learning the topography of the environment, but also in wayfinding performances (i.e., reaching for the targeted landmarks). Lövdén et al. (2005) assessed navigation performances using a virtual museum, in which participants had to learn its configuration in order to be able to find a specific position in the virtual museum itself (wayfinding test) or to place pictures of landmarks on a map (assessing spatial knowledge). Age differences were obtained in both tests, supporting a decline in spatial learning and wayfinding abilities with aging. So, the age-related differences are present in spatial learning as well as in wayfinding performances when participants are tested within VR devices.

Contrariwise, when the transfer of spatial knowledge from VEs to real is investigated, age-related differences are still reported in the wayfinding task but not in the spatial learning tasks. Indeed, Foreman et al. (2005) studied the transfer of spatial knowledge from a virtual shopping mall to its real version. They used map drawing, pointing, and wayfinding tasks toward invisible targets in the real shopping mall as recall tasks, after four learning sessions in the virtual mall. Their results showed age-related differences in the wayfinding task but not in the pointing or map drawing task. Similar findings have been reported by Kalia et al. (2008) using a photorealistic VE, but also by Taillade et al. (2012) who used a more larger size VE than the two previous studies including measures assessing the efficiency of the planned routes (direction errors and time to choose directions). This last study revealed further that wayfinding difficulties in older adults were strongly related to their declines in measures of executive and spatial memory functioning (assessed by conventional paper-pencil tests) while wayfinding performances of young adults were only mediated by executive measures. This suggested that the simultaneous process of encoding and retrieving spatial information in order to use it for path planning or navigation monitoring (path progression, spatial updating, etc.) may also have exceeded the older adults' executive and memory capacities, making it more difficult for them to perform the wayfinding task. This assumption had also been supported by the findings of Iaria et al. (2009) and of Foreman et al. (2005) where, despite a good representation of the environment, older adults had wayfinding difficulties.

Overall, this means that virtual-real transfer task is in itself particularly relevant to capture mediating effects of age-related declines of fronto-executive and hippocampal-spatial memory in navigational behaviors exhibited by elderly people, but it's also leverage for spatial learning for elderly persons. Such conclusions require further investigations and in particular to respond an important issue often overlooked in VR-based aging studies, which is the role played by the motor activities engaged during the spatial learning phase for controlling the VR interfaces. The use of a motor interactors, such as a mouse or a joystick (or even a steering wheel for driving simulator), was very early employed as a tool allowing better spatial learning or better wayfinding performances (see for review, Chrastil & Warren,

2012). According to the navigation modes defined in the taxonomy by Wilson *et al.*, (1997), the specific capture of motor activities refers to the comparisons between the two VR exploration conditions: (1) physically passive navigation (the subject visualizes a pre-recording route in virtual environment without moving) and (2) physically active navigation (the subject moves using a motor interactor in following directions given by an experimenter in order to perform a given route). This comparison is usually labeled *active exploration or navigation effect* (for review, Chrastil & Warren, 2012). In young adults, a positive effect of active exploration on wayfinding performance based on virtual-real transfer task (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, & N’Kaoua, 2008; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N’Kaoua, 2009; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N’Kaoua, 2010; Wallet, Sauzéon, Pala, Larrue, & N’Kaoua, 2011) while contradictory results are found for spatial learning performance relative to the different levels of spatial knowledge (landmark, route or survey) (eg., *for positive effect* see, Attree, Brooks, Rose, Andrews, Leadbetter, & Clifford, 1996; Péruch, Vercher & Gauthier, 1995; Brooks, Attree, Rose, Clifford & Leadbetter, 1999; *for no effect*, Cutmore, Hine, Maberly, Langford, Hawgood, 2000; Plancher, Nicolas, & Piolino, 2008; Gaunet, Vidal, Kemeny, & Berthoz, 2001; Foreman, Sandamas, & Newson, 2004; Carassa, Geminiani, Morganti, & Varotto, 2002; Farrell, Arnold, Pettifer, Adams, Graham, & MacManamon, 2003; *for a negative effect*, see: Sandamas & Foreman, 2007). Accordingly, a positive effect of an active exploration can be expected in young adults’ wayfinding performances, while a conclusion is difficult regarding the three-levels of spatial knowledge. Regarding the aging effect, at the best of our knowledge, no study has nowadays addressed directly the age-related difference in VR-based wayfinding tasks in respect of the active/passive exploration manipulation. Indeed, only the study by Plancher and her collaborators (2008) from a driving simulator assessed the role of active and passive learning in age-related differences on several components of episodic memory (what, where, when, details). After a learning phase in which participants were asked to memorize the most information as possible during a travel in virtual district, as driver (active condition) or passenger (passive condition), they were tested on the recall of objects, details relative to these objects, and more spatial informations as object positions respective to the body and along the route, and direction changes relative to objects. They found no significant effect of “driving” vs “passenger” conditions on the memory performances whatever the component tested (episodic or spatial components), suggesting no effect of active exploration in memory for object or object position. The lack of benefit from an active exploration is interpreted as a dual task effect during encoding phase in which participants do not have enough resources in the active condition to pay attention to every detail of the environment. Similar explanation is also advanced in other studies testing the possible negative effect of sensorimotor control on spatial memory performances: Lövdén et al. (2005) found that walking on a treadmill without any help to maintain balance had a negative effect on spatial memory performances in a virtual museum in older participants, and not for the young participants. The authors concluded that the sensorimotor control required for motor activities could bring participants in a dual-task situation, for which age-related difficulties are usually reported in the literature (Li, Krampe & Bondar, 2005; Riediger, Li & Lindenberger, 2006; for example). It seems that older adults tend to “prioritize” the sensorimotor control (requiring working memory resources) other cognitive control when dual “cognitive-sensorimotor” control are necessary (Li, et al., 2005; Doumas, Smolders & Krampe, 2008). This phenomenon, added to the executive, memory and sensorimotor decline could also contribute to the general decline in spatial memory and wayfinding performances. Note that this dual task effect could be different between route and survey acquisition since the acquisition of route knowledge is more automatic than survey acquisition (Chrastil & Warren, 2012).

Nowadays, no study has assessed the role of age on the “active-passive” effect, specifically on spatial memory and navigation performance in large scale naturalistic spaces. Hence, the aim of this study was to assess the aging related differences on motor “active-passive” exploration effect in spatial memory and wayfinding performances in large district of Bordeaux city, and to study their connections with the mediating role of age-related declines in spatial, memory, executive abilities.

METHOD

Participants

The participants were 32 young healthy adults (mean age = 23,12; $SD = 2,97$; age range: 18-30) and 32 older adults (mean age = 64,50; $SD = 3,68$; age range: 58-72). All of the participants were volunteers, native French speakers and right-handed. From a general questionnaire, they reported they were healthy and without any visual, neurological or psychiatric disorders. This self-assessment procedure, although possibly limitative, was designed to not lengthen the experiment duration (which was already long with the virtual experiment and the neurocognitive assessment). Young adults were recruited at the University of Bordeaux and the older adults were recruited from a Senior University in Bordeaux (‘Université du Temps Libre’). Older adults were tested with the Mattis Dementia Rating Scale as an exclusion test (exclusion for a score < 129).

The young and old groups were divided between “active” and “passive” groups.

All of the subjects had to complete a French version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ; Kennedy, Berbaum, & Drexler, 1994) immediately after the learning phase in the VE. This questionnaire measures the severity of sickness induced by 3D simulators¹². Participants also had to rate their New Technology (NTIC) experience with computers and computer games (Moffat et al., 2001)¹³. The Everyday Visuo-Spatial Difficulties (EVSD) with the Spatial Orientation questionnaire (wayfinding and object memory subscores; Skelton, Bukach, Laurance, Thomas, & Jacobs, 2000) and the French adaptation of the Mill Hill Vocabulary Scale (Deltour, 1993) and were also administered.

There were no significant inter-group differences between active and passive conditions for age ($p=.67$), education level ($p=.28$), the Mill Hill Vocabulary test ($p=.86$), the Skelton Wayfinding score ($p=.90$), the Skelton Object Memory score ($p=.97$), the NTIC ($p=.21$) and the SSQ ($p=.40$) scores.

There was no age effect for education level ($p=.45$) and the Skelton Object memory score ($p=.23$). There was a significant age effect for the Mill Hill Vocabulary test ($p<.0001$), the Skelton Wayfinding score ($p<.05$), the NTIC ($p<.0001$). The young had higher scores on the Skelton Wayfinding questionnaire, indicating that they report more wayfinding difficulties than older adults, in accordance our previous experiment (Taillade et al., 2012). The older adults had higher scores on the Mill Hill Vocabulary test and had lower scores on the NTIC questionnaire.

There was no interaction between age and navigation (active vs. passive) conditions for the Education level ($p=.28$), the Mill Hill Vocabulary test ($p=.86$), the Skelton Wayfinding score

¹² The questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered under three factors: Oculomotor, Nausea

and Dizziness. Symptoms were associated with presence/absence and with their degree of severity. Answers were scored 0 for ‘absence’ of symptoms, 1 for ‘mild’ symptoms, 2 for ‘present’ and 3 for ‘severe’. Weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy et al. (1994).

¹³ This includes three items that were rated from 0 to 7; the maximum score was 21 for each participant.

($p=.90$), the Skelton Object Memory score ($p=.97$), the NTIC ($p=.21$) and the SSQ ($p=.40$) scores. The characteristics of the subjects for each group are presented in Table 1.

Table 1: Characteristics of the participants

	Young		Old		ANOVA (Group * Exploration)
	Active (mean±SD)	Passive (mean±SD)	Active (mean±SD)	Passive (mean±SD)	
N	16	16	16	16	Group effects
Age	23,13 (3,13)	23,20 (2,96)	64,87 (2,90)	64,07 (4,11)	F(1,60)=2330,48 ; $p<.0001$
Education Level	15,33 (2,09)	15,67 (1,72)	15,87 (3,02)	14,20 (2,43)	F(1,60)=1.194 ; $p=.28$
Mill Hill Vocabulary	23,40 (4,29)	23,80 (4,84)	28,47(2,33)	28,40 (3,20)	F(1,60)=24,367 ; $p<.0001$
Skelton Wayfinding	27,20 (13,95)	27,33 (13,48)	19,33 (12,42)	20,00 (8,77)	F(1,60)= 5.703 ; $p<.05$
Skelton Object Memory	18,20 (7,04)	17,67 (6,68)	19,87 (8,12)	20,26 (5,03)	F(1,60)=1,471 ; $p=.23$
NTIC	15,00 (4,63)	13,31 (4,77)	9,40 (4,00)	8,47 (2,29)	F(1,60)=25,239 ; $p<.0001$
SSQ	83.32 (100.05)	219,73 (238,31)	194,70 (271,31)	143,72 (154,23)	F(1,60)=0.084 ; $p=.77$

VR-based Material and Procedure

All of the material and procedures are derived from previous studies demonstrating the relevance of VR-based applications to study spatial learning (Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011). The VE was a replica of the district near Bordeaux's hospital. It was created using the Virtools© software. Significant landmarks (signpost, sign, and urban furniture) were included in the VE. The apparatus used in the VR room was a Dell© personal computer (3GHz, 5 Gb RAM) with a NVIDIA© Quadro FX 4400 graphics card, a F1+ © projector, a 2×1.88-meter screen and a Thrustmaster joystick for exploration.

The procedure was divided into three steps as follows: (1) a training phase (15 minutes), where each participant was trained to navigate in an unused part of the VE, to allow the participants to be familiarized with the virtual navigation and joystick use and to confirm that none of the participants had major simulator sickness (mostly for the older adults); precisely during training phase, they had to control their trajectory (linear and rotations) on a street and between trees until they made no translational or rotational mistakes; (2) a learning phase (15 minutes), where the participants learned a route in the VE, which was 787 meters long, and composed of nine streets, 13 intersections and 11 direction changes; (3) and a restitution phase, where two kinds of tasks were performed by the participants after a 10-minutes retention interval.

The participants used a joystick to control their movements in the VE and carried out instructions given by the experimenter in the "Active" condition. In the "Passive" condition, the participants did not interact with the VE and only had to watch on the screen displaying the travel (as in our previous studies: Wallet et al., 2008, 2009, 2010, 2011).

Wayfinding Task

In the second step, participants were asked to replicate the route that they learned in the VE in the real Bordeaux district. To this end, the participant was brought to the starting point in the real district which corresponded to the virtual one, and had to recall the path. Wrong turns and stops before deciding to change directions (when the subject stops more than five seconds and looks around) were

counted. When a mistake occurred after a stop, both were counted. If the subject made a wrong decision, he was shown the correct direction by the experimenter and continued on the route. Thus, two scores were calculated from this task: the number of direction errors (wrong turns) and the number of stops during the wayfinding task, as a probe of the use of spatial representation to perform a navigational task (Lapeyre, Hourlier, Servantie, N’Kaoua, & Sauzéon, 2011; Wallet et al., 2008, 2009, 2010, 2011).

Spatial Memory Tasks

In the third step, participants underwent two tasks. The first was a map drawing task, known to be well performed when participants have developed a good spatial cognitive map of the environment (Lapeyre et al., 2011; Wallet et al., 2008, 2009, 2010, 2011): the subject has to draw the route learned in the VE on a blank sheet of paper. The drawing had to be made of connected segments, representing the linear locomotion and direction changes. The score is the number of correct directions given from the beginning of the path. The maximum score is 11. The second was a picture classification task, known to be well performed when participants have well-developed route knowledge of the performed path (Lapeyre et al., 2011; Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011): the goal of this task was to chronologically order 12 pictures that corresponded to different points of views of the district encountered along the route. The score is a sequence score: 1 point is given if the photo position corresponds to the correct position in the overall sequence and half of a point is given if the position is incorrect but near a picture that immediately follows with respect to the chronological order. The maximum score is 12. From the above descriptions, the picture classification and map drawing tasks were used as a probe of ‘route’ and ‘survey’ representations, respectively. The orders of the tasks were counterbalanced between the subjects.

Neuro-cognitive Assessment

Several neuropsychological tests were administered to each participant to estimate their cognitive functioning, assessing three cognitive domains: Visuo-spatial (VS) abilities, Visuo-spatial memory (VS-M), and Executive functioning (EF). These tests were administered before and after the trainings and the learning test in VR, and their order was counter-balanced between subjects.

Visuo-Spatial Functioning (VS): The VS evaluation included *mental rotation abilities* (i.e., The Mental Rotation Test, MRT, by Vandenberg & Kuse, 1978) and the *VS working memory* with the Backward Corsi Span Test (BCS) of the WMS-III (Wechsler Memory Scale-III; Wechsler, 1981).

VS Memory (VS-M): The Visual Reproduction Test, including immediate free recall and delayed recognition tasks, from the Wechsler Memory Scale-III (WMS-III; Wechsler, 1981) were used.

Executive Functioning (EF): The EF evaluation included, the *cognitive flexibility* with the part B of the Trail Making Test (TMT B; Reitan, 1992) and the *Five Point Test* (FTP, perseveration percent score; Regard, Strauss & Knapp, 1982), *inductive reasoning abilities* with Raven’s Matrices Test (standard form; J. Raven, J. C. Raven, & Court, 2003).

RESULTS

The results are organized into three parts. The first referred to the VR-based results in young and old adults from the active/ passive exploration manipulation within the virtual environment. The second presented the age-related differences occurred on the three neurocognitive domains (VS; VS-M; EF) assessed with conventional paper-pencil tests. And finally, the third focused on correlation results between the VR-based performances and the neuro-cognitive measures.

VR-Based performance

Two-way ANOVA [2 (Age group: young; old) x 2 (Learning condition: Active; Passive)] analyses were carried out on each spatial learning and navigation measure.

-VR-based Wayfinding Task: On the errors scores, the results showed a significant effect of age [F (1,60)=19,512; p<.0001], the young participants making less errors than older adults. No effect of learning condition [F (1,60)=0,439; p>.500] was obtained but, the interaction between age and learning condition was significant [F (1,60)=7,563; p<.05], the active participants making less errors in the young group but more errors in the old group.

On stops scores, a significant effect of age [$F(1,60)=28,886$; $p<.0001$] was found where the young participants making less stops than older adults. Also, only the interaction between age and learning condition [$F(1,60)=10,788$; $p<.01$] was significant, the active participants making less stops in the young group but more stops in the old group.

- *VR-based Spatial Memory Tasks*: On the map task, the results showed no significant effect of age ($F(1,60)=0,479$; $p>.400$), a significant effect of navigation mode ($F(1,60)=6,742$; $p<.05$) and no significant interaction between them ($F(1,60)=0,187$; $p>.600$).

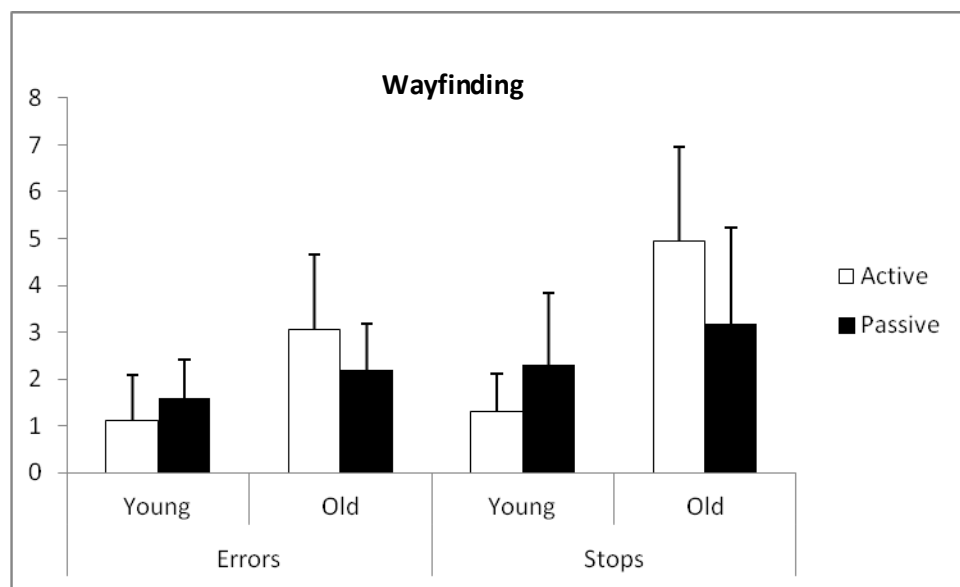
For picture classification task, the results showed no significant effect of age ($F(1,60)=0,692$; $p>.400$) and navigation mode ($F(1,60)=0,232$; $p>.600$), and no significant interaction between these two factors ($F(1,60)=0,49$; $p>.400$).

Neuro-cognitive Assessment

Two-way ANOVA [2 (Age group: young; old) x 2 (Active-Passive condition: Active; Passive)] analyses were carried out on each neurocognitive measure.

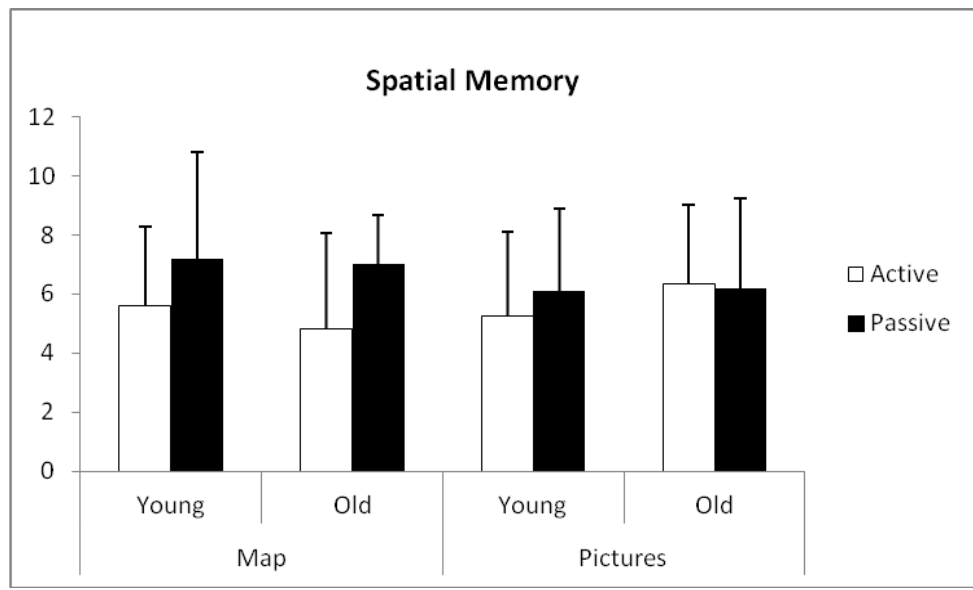
All these analyses indicated none simple or interaction effect including the Active-Passive condition factor. By contrast, age effect was significantly observed in all the dependant measures relative to the three cognitive domains of interest for navigation behaviors. Young performed higher than old counterparts for visuo-spatial abilities (VS), visuo-spatial memory (VS-M) and executive functioning (EF) measures (Table 2).

Figure 1 : Wayfinding performances as a function of age and navigation condition



Number of Wayfinding errors and stops, according to active and passive learning conditions and age; ANOVAs (Group*Exploration) results.

Figure 2 : Spatial memory performances as a function of age and navigation condition



Sketch drawing scores and pictures classification scores, according to active and passive learning conditions and age; ANOVAs (Group*Exploration) results

Correlations between wayfinding performances, Spatial Memory and neuro-cognitive measures

Correlations, global and partialled out for the age factor (coded as young=1; old=2) (Tacconnat, Clarys, Vanneste, Bouazzaoui, & Isingrini, 2007) were analysed, according to active and passive exploration conditions and only for VE based measures sensitive to learning conditions (wayfinding scores and map drawing task). For the two Wayfinding scores, a z score was computed from errors and stops performances was to analyse correlations between wayfinding performances and neuro-cognitive measures.

Wayfinding z score: In the active condition, the wayfinding z score was significantly correlated with all the visuospatial abilities (the mental rotation test; $p < .05$ and the digit symbol coding test ; $p < .01$), all the visuospatial memory measures (the immediate recall; $p < .05$ and the delayed recognition task of the WMS-III ; $p < .01$) and all the executive measures (TMT B ; $p < .01$; the Five point test ; $p < .05$; and the Raven’s Matrices ; $p < .0001$). By contrast, when the age factor was partialled out, all the correlations became not significant, except for the recognition task of the WMS-III ($p < .05$) and the Raven’s matrices ($p < .01$).

In the passive conditions, the wayfinding z score was significantly correlated with all visuospatial measures (the mental rotation test; $p < .05$ and the digit symbol coding; $p < .01$); with all the visuospatial memory measures (the immediate recall; $p < .01$ and the recognition test of the WMS-III; $p < .05$) and only one the executive measure (the Raven’s Matrices, $p < .05$). By contrast, when the age factor was partialled out, all the correlations became not significant.

So, the wayfinding performances under both active and passive conditions were related to VS, VS-M and EF measures when age variable is not controlled, whereas the wayfinding performances only under active condition were related with VS-M and EF measures.

Table 2: Participant's scores on the neuropsychological assessments and ANOVAs (Group*Exploration) results.

NAVIGATION MODE	YOUNG GROUP		OLD GROUP		ANOVA (Group * Exploration) <i>significant effects</i>
	Active (mean±SD)	Passive (mean±SD)	Active (mean±SD)	Passive (mean±SD)	
VISUO-SPATIAL ABILITIES					group effect:
Mental Rotation Test	8,81 (1,42)	8,56 (2,12)	7,37 (1,50)	6,25 (1,78)	F(1,60)=22,443 ; p<.0001
BCS	19,12 (9,20)	17,81 (8,50)	10,37 (5,94)	9,19 (4,79)	F(1,60)=18,842; p<.0001
VISUO-SPATIAL MEMORY					group effect:
Mem III IR	95,25 (8,623)	98,56 (5,09)	87, 19 (12,38)	85,12 (9,13)	F(1,60)=25,212; p<.0001
Mem III Rec	46,37 (1,74)	46,69 (0,87)	43,44 (3,48)	43,50 (2,80)	F(1, 60)=13.489; p<.001
EXECUTIVE FUNCTIONING					group effect:
TMT B	45,62 (16,66)	46,41 (15,70)	64,44 (22,57)	62,91 (24,20)	F(1,60)=12,290; p<.001
FPT (pers %)	2,69 (3,77)	2,59 (6,31)	13,37 (22,05)	12,37 (16,16)	F(1,60)=8,355; p<.01
Raven's Matrices Test	55,87 (2,87)	54,44 (3,78)	47,37 (4,32)	48,56 (5,02)	F(1,60)=49,824; p<.0001

Map drawing task: In the active condition, the map drawing score was not significantly correlated to visuospatial measures or to executive measures, but was significantly correlated with one of visuospatial memory measures (immediate recall of the WMS-III ; p<.05). And, this correlation remained significant even after that the age factor was partialled out (immediate recall of the WMS-III; p<.05). Also, the correlation with one of executive measure became significant (the Five point test; p<.001).

In the passive condition, the map drawing task was not significantly correlated with any of the visuospatial, visuospatial memory and executive measures. When the age factor was partialled out, these correlations were not modified.

Table 3: Global correlations and correlations partialled for age between neuro-cognitive assessments (VS, VS-M, EF) and Wayfinding z scores and map scores according to navigation conditions (active vs passive).

DISCUSSION

No study has assessed the age-related differences in navigation and spatial learning tasks according to active vs. passive motor exploration manipulation. Additionally, no study has addressed today the issue of the age changes in the active exploration effect in light of the mediating effect of aging decline on spatial abilities, on memory as well as on executive functioning. The present results give insights on these issues.

Age-related differences in spatial memory and wayfinding performances according to Active/passive manipulation.

Among main results reported here, the first ones were a negative effect of age on wayfinding performances, but no negative effect of age on spatial memory performances (map drawing and picture classification task, assessing route and survey knowledge). This pattern of age-differences on wayfinding and spatial memory performances fully agrees with our previous study focusing on virtual-real transfer of spatial learning for achieving routes in real condition (Taillade, et al., 2012). So, this supported the view that virtual-real transfer task is particularly relevant to capture aging effects in navigational behaviors, but also to make a leverage for a better spatial learning for elderly persons.

Second, interestingly, for both the young and old participants, a detrimental effect of active learning was observed on the map drawing task (probing the survey level) while no significant effect was observed on the photo classification tasks (probing the route level). It clearly indicated that the motor control under an active condition has deteriorated the spatial learning specifically in the achieving of elaborate survey knowledge. This fitted with the few results reported in young adults for survey knowledge measures (Sandamas & Foreman, 2007; Péruch et al. 1995). As the survey knowledge acquisition processes are more effortful processes compared to route ones (Siegel & White, 1976; Montello, 1998; Ishikawa & Montello, 2006; Hegarty et al., 2006), this means that the motor control during spatial learning is resource demanding and thus can be seen as a dual-task condition that logically affects more the acquisition of survey knowledge being more controlled than route acquisition as recently suggested (Chrastil & Warren, 2012). This conclusive result may give insights on the inconsistency of findings reported in the young adults' studies relative to the active exploration effect, according to the different levels of spatial knowledge. Indeed, as the competition for the processing resources within a dual-task depends on the allocation resource initially required for each on the two tasks (Norman & Bobrow, 1976), inconsistent findings such as void active exploration effects, can likely reflect spatial learning tasks not sufficiently resource demanding (Cutmore et al., 2000; Plancher et al., 2008; Gaunet et al., 2001; Foreman et al., 2004; Carassa et al., 2002; Farrell et al., 2003). For instance, the size of the virtual environment used is often relatively small (a building with one level and a few hallways), and so the development of survey representation is rendered not complex. So, the lack of difficulty in the spatial learning task might not be sufficient enough to create a resource-limited condition when a motor active condition is added. In the same vein, spatial learning task in data-limited condition could benefit from motor activity as a source of subject's motivation or self-involvement in the task, thus explaining some positive effects reported in few studies (Attree, et al., 1996; Brooks, Attree, Rose, Clifford & Leadbetter, 1999). In all cases, the present results revealed the importance of assessing spatial learning abilities with virtual environments sufficiently in large-scale and as rich and complex as real life to capture a dual-task effect (due to motor activity) in the subjects' learning performance.

Finally, and most importantly, we still found for the young group a positive effect of active learning in the two scores of wayfinding performances (Wallet, et al., 2008; 2009; 2010; 2011) while a negative effect in these two wayfinding scores were exhibited by the old group. Accordingly, as expected, an active virtual exploration of the virtual district enhances in young adults the subsequent wayfinding performances in real condition while it is demonstrated as detrimental for elderly subjects. This aging effect mirrors the well known increase of age-related difference in dual-task situations (Verhaeghen, Sliwinski, & Cerella, 2003), notably in competitive situations between "cognitive control" and "motor control" like the walking and talking or memorizing (Li et al., 2005). This age-related dual task effect was also found in a similar study to ours, in which participants had to walk on a treadmill and to learn the configuration of a virtual museum (Lövdén et al., 2005). Two conditions were

compared, the first allowing the participants to control their balance with hand trails and not for the second. These two conditions showed comparable performances in the young participants. On the contrary, the condition in which participants had to control themselves their balance induced worse spatial memory performances in the older group. This dual task effect is explained by the decline of balance control due to aging (Ketcham & Stelmach, 2001), requiring then higher working memory resources and finally affecting simultaneous cognitive activities.

If a dual-task effect interpretation of motor activity during learning matched well to all the older subjects' performances, it is more obvious for the young ones. Indeed, despite an actual detrimental effect of active condition on survey knowledge score, the young adults exhibited paradoxically better wayfinding performances after an active learning than after a passive learning condition. This means less accurate survey knowledge has respectively rendered young and old adults as high or low wayfinding performers. For a better understanding of this paradox, we have investigated the effect of active/passive condition on the relationships between the wayfinding performances, map scores and neuro-cognitive measures, depending on the small-scale spatial abilities, frontal/executive and hippocampal/memory distinction.

Relation between survey knowledge, wayfinding, performances and neuro-cognitive measures

Regarding to survey knowledge performance (probed by the map drawing score), an overall result was that significant correlations with the studied neuro-cognitive correlates are found only for the active motor condition, but not for the passive one. Precisely, the map drawing score after active condition was correlated with visuo-spatial memory (recall score rather than recognition one) and not with small-scale spatial abilities measures and this, irrespective of the variance induced by the age factor. By contrast, correlation between map drawing score and executive measures (specially visuo-spatial flexibility measure; ie., Five point test) was significant only when the age variable was partialled out. All together, the results indicated that compared to the passive condition, the survey knowledge performance under active condition is globally more based on controlled processing including visual-spatial recollection and visuospatial flexibility processes. This corroborated our assumption that the detrimental effect of the active condition on survey knowledge processes in all the participants is due to a dual-task effect that required mobilizing more resource demanding processes. Furthermore, aging variable did not affect the association with the spatial memory measure, but specially affected the association between survey knowledge and executive functioning score. Beside this, old participants performed as well as young ones on the survey knowledge task. So, the lack of executive functioning association with aging means that the elderly used a cognitive strategy differing from that by young ones, in terms of contributive role of executive functioning as another evidence of age-related fronto-executive decline. Therefore, to achieve the same level of survey knowledge performance, elderly used a cognitive strategy based mostly on spatial memory while that of young adults is based on both spatial memory and executive functioning.

Table 3: Global correlations and correlations partialled for age between neuro-cognitive assessments (VS, VS-M, EF) and Wayfinding z scores and map scores according to navigation conditions (active vs passive).

		<i>VS</i>		<i>VS-M</i>		<i>EF</i>		
		<i>MRT</i>	<i>DSC</i>	<i>IR</i>	<i>Rec</i>	<i>TMT B</i>	<i>FPT</i>	<i>Raven</i>
Active Condition	Z Wayfinding							
	<i>Global</i>	-0,42*	-0,48**	-0,39*	-0,53**	0,46**	0,36*	-0,67****
	<i>Partialled for age</i>	-0,06	-0,23	-0,07	-0,36*	0,26	-0,01	-0,47**
	Map score							
	<i>Global</i>	0,20	0,30	0,40*	0,19	-0,14	-0,12	0,15
	<i>Partialled for age</i>	0,20	0,10	0,42*	0,15	-0,13	0,58****	0,16
Passive Condition	Z Wayfinding							
	<i>Global</i>	-0,42*	-0,42**	-0,43*	-0,34*	0,15	0,12	-0,36*
	<i>Partialled for age</i>	-0,18	-0,24	-0,20	-0,004	0,07	-0,02	0,01
	Map score							
	<i>Global</i>	0,15	0,27	0,19	0,20	-0,09	0,11	0,21
	<i>Partialled for age</i>	0,13	0,25	0,23	0,19	-0,11	0,05	0,17

Notes, *, $p < .05$; **, $p < .01$; ***, $p < .001$; ****, $p < .0001$

MRT: Mental rotation test; *DSC*: Digit symbol coding test; *IR*: Immediate recall of the *WMS-III*; *Rec*: Recognition test (delayed) of the *WMS-III*; *TMT B*: part B of the Trail Making test; *FPT*: Five Point Test; *Raven*: Raven's Matrices

Concerning wayfinding performance, an overall result was that more significant correlations with the studied neuro-cognitive correlates are found for the active motor condition compared for the passive one. Precisely, the wayfinding score after active condition was correlated to all the measures of small scale spatial abilities, memory and executive functioning whereas the performance after passive condition shared fewer correlations with executive function measures. Furthermore, when age factor was controlled, only the wayfinding score in active condition remained correlated with recognition memory score and the executive deducting score. Taken together, the results indicated that compared to passive condition, the wayfinding performance after active condition is globally more based on controlled processes-strategy including visual-spatial recognition and executive deducting processes. Once again, this corroborated our hypothesis of the adding of motor control during spatial

learning can be seen as a dual-task condition that in turn required mobilizing of more resource demanding processes to perform a subsequent wayfinding tasks.

The cognitive correlates indicated also that an active condition led the young participants to cope their wayfinding strategy relying on visual recognition and deductive reasoning abilities. This suggested that the young probably adopt a route knowledge strategy based on visual recognitions of landmarks, and route sequences to infer the correct path. This view is supported by the fact that an active condition deteriorated the survey knowledge but not the route knowledge performance (ie., photo classification task). Furthermore, a coping of wayfinding strategy based on route knowledge is likely very more powerful for the wayfinding task that is based on path recognition from virtual to real condition according to the well-known appropriate transfer effect in memory domain (Tulving & Thomson, 1973). In other words, better young adults' wayfinding performances after an active learning may reflect a wayfinding strategy coping supporting path recognition during the wayfinding task.

Also, the controlling of aging variable eliminated all the wayfinding associations with all the measures of small scale spatial abilities and memory for both the active and passive conditions, revealing thus mediating effects of age-related decline of spatial abilities and spatial memory in wayfinding performances as previously demonstrated (Taillade et al., 2012; Wolbers & Hegarty, 2010). Interestingly, the mediating effect of age-related executive decline is more prominent for wayfinding performance performed after an active learning than those performed after the passive one. So, executive decline in elderly adults is more critical for wayfinding performance after an active learning than a passive condition. So, the worsened age-related differences in wayfinding performance after active learning are related to their executive difficulties. One possible explanation may be that elderly adult have flexibility difficulties to implement a coping of wayfinding strategy (ie. switch from survey strategy to route strategy as implemented by young adults). In this context, they are less flexible than young adults to operate a strategy switch that could allow them to optimize their wayfinding performances. A such interpretation is also supported by recent findings by Echamendy et al. (2012) showing that when old adults have not achieved a survey knowledge of the environment they are more incline to exhibit worsened wayfinding difficulties in virtual maze tasks. This lack of flexibility to cope wayfinding strategy may also relate to a less awareness of wayfinding difficulties in everyday-life. Indeed, as reported once again here, the old adults over-estimated their wayfinding abilities compared to young adults, suggesting metacognitive inabilities with age to report everyday walking navigation problems (Taillade et al., 2012). It is obvious that low awareness of wayfinding difficulties can reduce the chances of strategy coping (see Hertzog & Dunlosky, 2011, for review on age-related metacognitive difference). Even if further evidences should support our interpretation, it could be assumed that the age-related paradoxical effect of active learning in wayfinding performance is related to aging executive decline for coping of wayfinding strategy according to available spatial memories.

To conclude, taken together, the present results indicated that the wayfinding difficulties observed in virtual-real transfer procedures originate from age-related failures in the complex orchestration of processes required to perform the wayfinding task, such as the interactions between spatial abilities, memory and executive processes, but also between cognitive and sensorimotor processes, as demonstrated for the first time by detrimental effects of motor activity during spatial learning. Indeed, as a dual-task condition, this study is the first to provide behavioral-based evidence showing that a motor activity during spatial learning deteriorates the survey knowledge acquisition with for consequence an increase of age-related differences in wayfinding performances associated mainly to executive factors. Such findings stress thus the critical role of motor interfaces that must be take account for future aging studies that are based on VR devices.

In addition, the lack of matching between self-reported and direct wayfinding measures with age indicates that direct measures (based on realistic VR applications) should be preferred over self-reporting questionnaires to accurately assess everyday wayfinding difficulties in older adults. This is especially relevant in light of the older adults' overestimation of their wayfinding abilities in walking situations. Finally, the present results fit also with neuro-imagery findings showing an age-related difference in spatial performances related to functional or structural modifications in the hippocampal, parahippocampal as well as the parietal and the prefrontal cortices (Antonova et al., 2009; Moffat et al., 2006; 2007; for review, Moffat, 2009; Klencken, et al., 2012).

References

- Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D. & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17 (2), pp. 125-143.
- Appleyard, D. (1970). Styles and methods of structuring a city. *Environment and Behavior*, (2), pp. 100-118.
- Attree, E. A., Brooks, B. M., Rose, F. D., Andrews, T. K., Leadbetter, A. G., & Clifford, B. R. (1996). Memory processes and virtual environments: I can't remember what was there, but I can remember how I got there. Implications for people with disabilities. [In P. Sharkey (Ed.), *Proceedings of the 1st European Conference on Disability, Virtual Reality, and Associated Technology* (pp. 117-121)]. Reading: University of Reading Press.
- Brooks, B. M., Attree, E. A., Rose, F. D., Clifford, B. R., & Leadbetter, A. G. (1999). The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory*, (7), pp. 65-78.
- Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F., & Varotto, D. (2002). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: The effect of efficient exploration. *Cognitive Processing*, (3-4), pp. 65-81.
- Chrastil, E. R. & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 19 (1), pp. 1-23.
- Cutmore, T. R. H., Hine, T. J., Maberly, K. J., Langford, N. M., Hawgood, G. (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human Computer Studies*, 53 (2), pp. 223-249.
- Deltour, J. J. (1993). Echelle de vocabulaire de Mill Hill de J. C. Raven. Adaptation française et normes européennes du Mill Hill et du Standard Progressive Matrices de Raven (PM 38) [Mill-Hill vocabulary scale of J. C. Raven. French adaptation and European norms]. Braine-le-Chateau, Belgium: Editions L'application des techniques modernes.
- Doumas, M., Smolders, C. & Krampe, R. Th. (2008). Task prioritization in aging: Effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Experimental Brain Research*, 187 (2), pp. 275-281.

- Etchamendy N., Konishi K., Pike G. B., Marighetto A., Bohbot V. D. (2011). Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: a study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus* (22), pp. 869-880.
- Farrell, M. J., Arnold, P., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T., & MacManamon, M. (2003). Transfer of route learning from virtual to real environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, (9), pp. 219-227.
- Foreman, N., Sandamas, G., & Newson, D. (2004). Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction. *Cyberpsychology and Behavior*, 7 (4), pp. 451-457.
- Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, (11), pp. 409-420.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. [In P. Schah & Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking* (pp.121-169)]. New York: Cambridge University Press.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T. & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Hertzog, C., & Dunlosky, J. (2011). Metacognition in later adulthood: Spared monitoring can benefit older adults' self-regulation. *Current Directions in Psychological Science*, 20, pp. 167-173.
- Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive Psychology*, 52 (2), pp. 93-129.
- Israël, I., Grasso, R., Georges-François, P., Tsuzuku, T., & Berthoz, A. (1997). Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. I. Basic properties. *Journal of Neurophysiology*, 77 (6), pp. 3180-3192.
- Kennedy, R. S., Berbaum, K. S., & Drexler, J. (1994). Methodological and measurement issues for the identification of engineering features contributing to virtual reality sickness. Paper presented at Image 7 Conference, Tucson, AZ.
- Ketcham, C. J., & Stelmach, G. E. (2001). Age-related declines in motor control. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging* (5th ed., pp. 349–379). San Diego, CA: Academic Press.
- Klencken, G., Després, O. & Dufour, A. (2012). What do we know about aging and spatial cognition ? Reviews and perspectives. *Ageing Research Reviews* (11), pp. 123-135.
- Lapeyre, B., Hourlier, S., Servantie, X., N'Kaoua, B., & Sauzéron, H. (2011). Using the landmark-route-survey framework to evaluate spatial knowledge obtained from synthetic vision systems. *Human Factors*, 53, pp. 647-661.

- Li, K. Z. H, Krampe, R. T. & Bondar, A. (2005). An ecological approach to studying aging and dual-task performance. [In: Engle RW, Sedek G, von Hecker U, McIntosh DN (eds). Cognitive limitations in aging and psychopathology (pp 190-218)]. Cambridge University Press, Cambridge, England. Li, Lindenberger, Freund & Baltes, 2001
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J. & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environments as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, (31), pp. 557-564.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., & Philbeck, J. W. (1999). Human navigation by path integration. [In R. G. Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes* (pp. 125 – 151)]. Baltimore, MD7 Johns Hopkins Press.
- Lorenz, C. A., & Neisser, U. (1986). Ecological and psychometric dimensions of spatial ability (Rep. No. 10). Emory Cognition Project, Atlanta, GA7 Emory University.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A. & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging*, 20 (4), pp. 683-694.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, pp. 787-796.
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, 27 (7), pp. 965-972.
- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17 (6), pp. 1274-1282.
- Moffat, S.D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environment. [In M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*, (pp. 143-154)]. New York: Oxford University Press.
- Navon, D., & Gopher, D. (1980). Task difficulty, resources and dual-task performance. In R. S. Nickerson [(Ed., *Attention and performance VIII*, pp. 297-315. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Norman, D. A. & Bobrow, D. G. (1976). On the analysis of performance operating characteristics. *Psychological Review*, 83 (6), pp. 508-510
- Péruch, P., Vercher, J., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, (7), pp. 1-20.

- Plancher, G., Nicolas, S., & Piolino, P. (2008). Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: Study in aging. *Psychologie et Neuropsychiatrie du Vieillessement*, 6 (1), pp. 7-22.
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (2003). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 1: General Overview*. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.
- Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.
- Regard, M., Strauss, E., & Knapp, P. (1982). Children's production on verbal and non-verbal fluency tasks. *Perceptual and Motor Skills* (55), pp. 839-844.
- Riediger, M., Li, S. C., & Lindenberger, U. (2006). Selection, optimization, and compensation (SOC) as developmental mechanisms of adaptive resource allocations: Review and preview. In J. E. Birren & K.W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging* (6th ed., pp. 289–313). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Sandamas, G. & Foreman, N. (2007). Spatial reconstruction following virtual exploration in children aged 5-9 years: Effects of age, gender and activity-passivity. *Journal of Environmental Psychology*, 27 (2), pp. 126-134.
- Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22, pp. 157-175.
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In H. W. Reese (Ed.): *Advances in child development and behavior* 10, (pp. 9-55). New York: Academic Press.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17 (8), pp. 618-626.
- Steffens, M., C., Buchner, A., Wender, K. F. & Decker, C. (2007). Limits on the role of retrieval cues in memory for actions: Enactment effects in the absence of object cues in the environment. *Memory & Cognition*, 35 (8), pp. 1841-1853.
- Taconnat, L., Clarys, D., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., & Isingrini, M. (2007). Aging and strategic retrieval in a cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. *Brain and Cognition*, 64, pp. 1-6.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Dejos, M., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Gross, C. & N'Kaoua B. (2012). Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application, *Aging, Neuropsychology, and Cognition*.
- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), pp. 352–373.

Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, (47), pp. 599-604.

Verhaeghen P., Steitz D.W., Sliwinski M. J., Cerella, J. (2003). Aging and dual-task performance: a meta-analysis. *Psychology and Aging*, 18 (3), pp. 443-60.

Vlček, K. (2011). Spatial Navigation Impairment in Healthy Aging and Alzheimer's Disease. In S. De La Monte (Eds.), *The Clinical Spectrum of Alzheimer's Disease - The Charge Toward Comprehensive Diagnostic and Therapeutic Strategies*, pp. 75-100.

Waller, D., Loomis, J. M., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin and Review*, 11 (1), pp. 157-163.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer: Effects of passive/active exploration mode in simple and complex routes for three different recall tasks. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, pp. 175-178.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject's strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6, pp. 572-574.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2010). Virtual/real transfer of spatial learning: Impact of activity according to the retention delay. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 8, pp. 115-118.

Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N'Kaoua, B. (2011). Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, (14), pp. 417-423.

Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. New York, NY: Psychological Corporation.

Wolbers, T., & Hegarty, M., (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (3), pp. 138-146.

Chapitre VIII : Discussion générale

1. Validité écologique de la RV

Comparaison entre apprentissages virtuels et réels et effets de l'âge

La dissociation entre capacités VS à petite et grande échelle (Hegarty et al. 2006) a été proposée sur la base des faibles relations observées entre tests papier-crayon nécessitant de manipuler mentalement des objets et mesures des capacités d'apprentissage ou de navigation dans les grands espaces (Hegarty & Waller, 2005). Les nombreuses études dans le domaine de la cognition spatiale ont permis de montrer que la navigation et l'apprentissage dans les grands espaces sont des activités complexes dépendantes de nombreuses aptitudes et fonctions (voir Wolbers & Hegarty, 2010). La RV s'est donc révélée être un outil efficace permettant de répondre au manque de validité écologique des tests de type papier-crayon et son utilisation dans le domaine de la cognition spatiale est maintenant très répandue.

Cependant, la RV tout en permettant de simuler et reproduire des situations réalistes présentent quelques limites. Le plus souvent, la navigation s'effectue avec des métaphores de déplacement (joystick ou clavier-souris...) très différentes des situations réelles. Ce type de navigation fournit généralement peu d'informations sensorimotrices. Il s'agira donc de considérer avec prudence les conclusions obtenues à partir d'applications utilisant la RV.

Cette prudence sera encore plus vraie dans le contexte du vieillissement, les personnes âgées étant peu familiarisées avec les nouvelles technologies et présentant des déficits sensoriels et sensorimoteurs.

C'est en prenant en compte ces différents facteurs que nous avons voulu évaluer l'effet du type d'évaluation (en réel vs. en RV) sur les effets du vieillissement obtenus sur les performances d'apprentissage et de navigation.

Les résultats que nous avons obtenus montrent une majoration du nombre d'erreurs sur toutes les mesures réalisées en RV par rapport à celles réalisées en réel. Cependant cet effet est identique quel que soit l'âge des participants, aucune majoration ou minoration significative des effets du vieillissement n'a été observée comme rapporté par quelques études précédentes (Kalia et al. 2008 ; Kalova et al. 2005 ; Cushman et al. 2008).

Si les difficultés de navigation au quotidien sont probablement moins importantes que celles observées dans les dispositifs de RV, l'absence de modification du pattern des effets de l'âge entre les conditions réelles et virtuelles crédite le pattern observé en RV, d'une certaine validité écologique. Toutefois, l'étude des prédicteurs cognitifs démontre quelques nuances. En effet, les performances de navigation en réel corrélaient avec la mesure de l'efficacité cognitive globale des sujets âgés et dans une moindre mesure avec leurs performances mnésiques ; à la différence, les performances de navigation en RV corrélaient plus avec les performances mnésiques des sujets mais aussi avec leurs performances exécutives. Cette implication différentielle des processus cognitifs peut être interprétée comme reflétant le recours à des capacités cognitives plus générales (voire plus basées sur les habitudes et connaissances de navigation) dans le cas de l'évaluation en environnement réel et le recrutement de processus plus contrôlés et exécutifs dans l'évaluation en RV, qui pour une grande partie des sujets était non familière. Ainsi, chez les âgés, la tâche de navigation en réel, de par son caractère plus familier serait plus dirigée par les connaissances alors que la tâche en virtuel par son caractère plus nouveau, serait plus sous contrôle des processus exécutifs. En effet, alors que la marche et la recherche d'indices visuels nécessaires à l'activité de navigation en réel relèvent de procédures hautement familières et procéduralisées, leurs équivalents en RV, à savoir le contrôle de joystick et l'exploration d'un EV en 3D demandent un contrôle plus important. Ainsi, en conclusion, les mesures réalisées en RV rapportent les

mêmes effets du vieillissement que les mesures directes réalisées en réel et à ce titre sont pertinentes pour établir les patterns de troubles spécifiques liés aux activités spatiales à grande échelle.

Liens entre mesures écologiques « directes » et difficultés spatiales quotidiennes rapportées par les sujets

Les évaluations de la cognition spatiale à grande échelle se sont développées en référence à deux types d'approche existant : les mesures spatiales à petite échelle et les questionnaires d'évaluation de la désorientation au quotidien. Les premières démontrent de faibles corrélations avec les mesures d'apprentissage et de navigation dans les grands espaces (Hegarty & Waller, 2005) et leur étude ne permet donc pas de prédire les performances d'apprentissage et de navigation dans les grands espaces, que ce soit des processus engagés ou de difficultés rencontrées au quotidien.

Les secondes portant sur le niveau fonctionnel de manière indirecte et leurs corrélations avec les performances obtenues dans des environnements réelles sont en général bonnes (eg. Hegarty et al. 2006). Toutefois, leur format ne permet pas l'étude et la compréhension des processus cognitifs engagés lors de la navigation et l'apprentissage dans les grands espaces.

Sur cette base, la validité écologique des nouveaux outils visant les capacités de navigation et d'apprentissage dans les grands espaces est souvent établie en référence aux relations entre auto-estimation des difficultés et performances mesurées directement. Si ce lien semble valide chez les sujets jeunes, il pourrait ne pas l'être chez la personne âgée. Etonnamment, peu d'études se sont intéressées au sujet. Dans la première (Dejos et al. soumis), les données rapportent un lien en mesures de navigation à grande échelle en RV et les auto-questionnaires de désorientation, lien également perdu chez le sujet âgé. Ce même pattern de résultats avait été également obtenu dans notre troisième étude (Taillade et al. 2012), montrant ainsi la robustesse de ce résultat.

Cette perte de relation pourrait avoir différentes explications, non exclusives les unes des autres :

- la diminution des capacités métacognitives : de nombreuses études rapportent l'échec des personnes âgées à évaluer avec précision leurs capacités cognitives (eg. Perrotin & Isingrini, 2010 ; Souchay et al. 2007) ;

- la baisse du nombre d'échecs (feedbacks négatifs) lors d'activités de déplacement : il est reconnu que les personnes âgées ont une préférence pour les lieux familiers plutôt qu'inconnus (Vlcek, 2011; Burns, 1999) et le caractère « routinier » et automatisé de leurs activités réduit considérablement le risque d'être confronté à un nouvel environnement susceptible de les mettre en situation d'être désorientés;

- la plus grande sensibilité aux stéréotypes : sous la pression de stéréotypes spécifiques au vieillissement (les personnes âgées ont peu de mémoire) ou au genre (les femmes ont un moins bon sens de l'orientation), les personnes ayant des capacités métacognitives affaiblies ou peu confrontées aux situations décrites dans les questionnaires, peuvent avoir tendance à ajuster leurs réponses au stéréotype dominant dont elles souffrent (Follenfant et al. 2005).

Ceci, ajouté à la perte de mémoire épisodique, entraîne la personne à répondre sur la base de ces compétences passées et non actuelles (qu'elle ignore souvent). Mis en lien avec les difficultés de navigation mesurées en situation écologique, la perte de relation entre auto-évaluation et performances réelles encourageant l'utilisation de mesures directes plutôt que rapportées indirectement par les sujets âgés, mais aussi l'étude du rôle de la métacognition dans le vieillissement normal.

2. Rôle des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation

La navigation et l'apprentissage dans les grands espaces ont été décrits comme des activités complexes et dépendantes de nombreuses fonctions et aptitudes (fonctions exécutives, mémoire, fonctions VS, utilisation d'informations sensorimotrices...). On pouvait donc supposer un rôle à la fois des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation au quotidien chez les personnes âgées. Leurs rôles avaient été suggérés dans quelques études utilisant des répliques de la piscine de Morris (Moffat et al., 2007) ou le couplage entre imagerie fonctionnelle et navigation dans un EV (Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Aucune étude ne semble pour le moment avoir testé cette hypothèse dans de grands espaces, en étudiant la relation à la fois entre des tâches d'apprentissage et de navigation dans des grands espaces et des mesures neurocognitives des fonctions mnésiques et exécutives.

Dans cette étude, nous avons obtenu un effet de l'âge sur les performances à la tâche de type « wayfinding », malgré des connaissances de l'espace identiques entre les jeunes et les âgés. Ce type de résultats avaient déjà été obtenu dans deux études précédentes (Iaria et al., 2009 ; Foreman et al., 2005). Ces observations suggèrent en elles-mêmes des difficultés pour récupérer les informations spatiales et/ou planifier et exécuter le trajet appris, probablement lié à un déclin exécutif.

L'analyse des corrélations globales entre performances de navigation et mesures neurocognitives avaient montré des relations significatives entre performances à la tâche de type « wayfinding » et mesures neurocognitives exécutives et mnésiques. Lorsque le facteur âge était contrôlé, ces corrélations sont devenues non significatives, montrant ainsi le rôle à la fois des déclinés mnésiques et exécutifs dans les difficultés de navigation chez les personnes âgées.

Plusieurs phénomènes pourraient expliquer ces résultats et restent à vérifier:

- Problèmes de récupération des informations spatiales (repères, routes et configurations...)

- Difficultés pour planifier les trajets

- Difficultés lors de l'exécution du trajet. Sur cet ensemble de difficultés, par exemple, il est possible qu'après la première exposition, les personnes n'ont peut-être pas acquis toutes les informations nécessaires à la navigation et soit encore en train d'encoder de nouvelles informations durant la tâche de rappel dans l'environnement (« wayfinding »), plaçant également les sujets en situation de double-tâche. La priorité serait mise alors sur l'apprentissage plutôt que sur les processus nécessaires à la navigation, conduisant à de moins bonnes performances dans la tâche « wayfinding ». Cet effet double tâche pourrait également expliquer en partie la relation entre les performances à la tâche « wayfinding » et les mesures neurocognitives de mémoire visuospatiale et du fonctionnement exécutif ce dernier jouant un rôle important dans l'effet double-tâche (Holtzer, Stern, & Rakitin, 2005).

- Difficultés liées au contrôle sensorimoteur que ce soit au niveau de l'utilisation du joystick lors de l'apprentissage ou de la marche lors du rappel. Un effet double-tâche contrôle « cognitif-sensorimoteur » pourrait se produire, en sachant que les personnes âgées ont tendance à donner la priorité au contrôle sensorimoteur par rapport au contrôle cognitif lorsqu'une situation de double-tâche se produit. Cet effet pourrait altérer les processus impliqués à la fois dans l'apprentissage (encodage et récupération) que durant la planification ou l'exécution du trajet du trajet.

Au total, les difficultés observées pourraient avoir pour origine les effets cumulés de ces différents phénomènes, ajoutés aux difficultés d'intégration sensorimotrices.

Des prochaines devraient prendre en compte tous ces phénomènes, afin de comprendre leurs relations et leurs rôles respectifs, à la fois dans les difficultés d'apprentissage et de navigation. Ces questions se posent également dans le cas du vieillissement pathologique, notamment la Démence de Type Alzheimer où la désorientation est un symptôme très fréquent. Le rôle des activités sensorimotrices et de l'effet double tâche et sa relation avec les difficultés mnésiques et exécutives ont été testés dans la dernière étude.

3. Effet du contrôle sensorimoteur dans les difficultés de navigations liées à l'âge

Différences liées à l'âge sur les performances de mémoire spatiale et de navigation (« wayfinding »), selon le type d'apprentissage (actif vs passif) :

Le résultat principal que nous avons obtenu est un effet négatif de l'âge sur les performances de navigation mais pas sur les performances de mémoire spatiale (connaissances de type « route » et « configurationnel »). Ce pattern est identique à celui trouvé dans notre étude précédente (Taillade et al., 2012).

Deuxièmement, nous avons obtenu un effet négatif de l'apprentissage actif sur la tâche de dessin de la carte, chez les jeunes comme chez les âgés. Par contre nous n'avons pas obtenu de différences significatives sur la tâche de classification de photos. Ceci indique que le contrôle moteur a détérioré spécifiquement l'acquisition du niveau de connaissance configurationnel. Ces résultats semblent en accord avec certaines études précédentes chez les sujets jeunes (Sandamas & Foreman, 2007; Péruch et al. 1995). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le contrôle moteur demande des ressources en mémoire de travail et par le fait que l'acquisition des connaissances configurationnelles demande plus d'efforts que pour les connaissances de type « route » (Siegel & White, 1976; Montello, 1998; Ishikawa & Montello, 2006; Hegarty et al., 2006 ; Chrastil & Warren, 2012), les participants en condition active se trouvant probablement en situation de double-tâche. Cette hypothèse que nous avançons, pourrait expliquer les résultats contradictoires concernant les différents niveaux de connaissances spatiales (repères, route et configurationnel) observés dans les études portant sur les apprentissages actif vs passif (pour revue, voir Chrastil & Warren, 2012). Ainsi, comme la compétition entre les ressources de traitement durant une situation de double-tâche dépend des ressources initialement requises pour chacune des deux tâches (Norman & Bobrow, 1976; Navon & Gopher, 1980), les résultats contradictoires comme un effet positif de la condition active pourrait être expliqué par une tâche ne demandant pas suffisamment de ressources pour conduire à un effet négatif du contrôle sensorimoteur (Cutmore et al., 2000; Plancher et al., 2008; Gaunet et al., 2001 ; Foreman et al., 2004; Carassa et al., 2002; Farrell et al., 2003).

Dans la plupart des études, les environnements utilisés sont relativement petits, rendant l'acquisition des connaissances configurationnelles moins complexes. L'absence de difficulté dans les tâches de mémoire spatiale ne serait donc pas suffisante pour créer une condition de ressources limitées lorsque le contrôle moteur est requis (dans la condition active).

De plus, les effets positifs de la condition active observés dans les espaces de petite taille (Attree, et al., 1996; Brooks, Attree, Rose, Clifford & Leadbetter, 1999), demandant peu de ressources cognitives, pourraient provenir d'une plus grande motivation ou d'implication des sujets. Dans tous les cas, notre étude a montré l'importance d'évaluer les capacités d'apprentissage spatial dans des environnements suffisamment grands et complexes (en condition réelle) pour révéler l'effet double-tâche (cognitif-moteur) dans les performances d'apprentissage spatial.

Enfin, comme attendu, nous avons trouvé un effet positif de l'apprentissage actif chez les jeunes pour les deux scores des tâches de navigation (« wayfinding ») (Wallet, et al., 2008; 2009; 2010; 2011), mais un effet négatif sur ces deux scores chez les personnes âgées. Il

semble que les apprentissages actifs améliorent les performances de navigation chez les jeunes mais détériore celles des âgés.

Nous avons une fois de plus avancé que cet effet puisse avoir pour origine un effet double-tâche, connu pour mettre les personnes âgées en difficultés (Verhaeghen, Steitz Sliwinski, Cerella, 2003), notamment dans les situations de double-tâches « sensorimotrice-cognitives » (Li et al., 2005).

Cet effet avait déjà été observé dans une étude précédente et similaire où les participants devaient apprendre la configuration d'un musée virtuel en marchant sur un tapis roulant (Lövdén et al., 2005). Deux conditions étaient comparées, la première permettant aux participants de contrôler leur équilibre, la seconde ne le permettant pas. Cette seconde condition a conduit à de moins bonnes performances de mémoire spatiale et de navigation chez les personnes âgées mais pas chez les jeunes. L'effet double tâche observé ici était expliqué par les problèmes de contrôle de l'équilibre chez les personnes âgées (Ketcham & Stelmach, 2001), nécessitant plus de ressources en mémoire de travail.

Si notre interprétation en termes d'effet double-tâche est cohérente pour toutes les performances des âgés, elle est moins évidente chez les jeunes. En effet, malgré un effet négatif de l'activité motrice sur les scores du test de dessin de la carte (connaissances de type « configurationnelles »), les jeunes ont montré de meilleures performances à la tâche « wayfinding » après un apprentissage actif par rapport à la condition passive. Cela signifie que les mauvaises connaissances de type « configurationnelles » ont rendu les jeunes plus efficaces et les âgés moins efficaces dans la tâche de navigation (« wayfinding »).

Pour une meilleure compréhension de ce paradoxe, nous avons étudié l'effet des conditions actives/passives sur la relation entre les performances de navigation (« wayfinding »), les scores à la tâche de dessin de la carte et les mesures neurocognitives, visuospatiales, frontales/exécutives et hippocampique/mnésiques.

4. Effet du contrôle moteur sur les relations entre performances de navigation (« wayfinding »), connaissances de type configurationnelles et mesures neurocognitives :

Concernant les connaissances configurationnelles (tâche de dessin de la carte), nous avons obtenu une relation significative avec les mesures neurocognitives uniquement pour la condition active. Le score de dessin de carte était corrélé avec le score de mémoire visuospatiale (rappel libre plutôt que la reconnaissance) et pas avec les mesures des capacités visuospatiales à petite échelle, que le facteur âge soit contrôlé ou non. Au contraire, la corrélation entre le score de dessin de carte et des mesures des fonctions exécutives (mesures de flexibilité, Five point test) n'était significative que lorsque le facteur âge était partialisé. Ces résultats suggèrent que l'acquisition des connaissances de type « survey » en condition active est plus basée sur des processus contrôlés comme la flexibilité ou la recollection d'informations visuospatiales. Ceci confirme notre hypothèse expliquant l'effet négatif de la condition active sur l'acquisition des connaissances configurationnelles par l'effet double-tâche chez tous les participants, requérant plus de ressources cognitives. De plus, le facteur âge n'a pas affecté l'association avec les mesures de mémoire spatiale, mais a affecté l'association entre les mesures du fonctionnement exécutif. En plus de cela, les jeunes et les âgés avaient des performances identiques sur la tâche de dessin. La perte de relation avec les fonctions exécutives avec l'âge suggère que les âgés utilisent une stratégie différente des jeunes, probablement lié à leur déclin exécutif. Pour atteindre le même niveau de connaissance configurationnel, les âgés auraient utilisé une stratégie basée principalement sur leur mémoire et les jeunes sur une stratégie basée à la fois sur leur mémoire et leurs fonctions exécutives.

Pour la tâche de navigation (« wayfinding »), nous avons obtenu des corrélations plus significatives avec les mesures neurocognitives en condition active qu'en condition passive. Le score à la tâche « wayfinding » après l'apprentissage actif était corrélé à toutes les mesures des fonctions visuospatiales, mnésique et exécutives alors qu'après un apprentissage passif, ils l'étaient faiblement avec les mesures exécutives. De plus lorsque le facteur âge était contrôlé, seul les scores de la tâche « wayfinding » sont restés corrélés avec le score de reconnaissance et le score de raisonnement inductif. Ces résultats suggèrent dans l'ensemble que la navigation après l'apprentissage actif est plus basée sur des processus contrôlés comme la reconnaissance et le raisonnement inductif qu'en condition passive. Ici encore cela confirme l'idée que le contrôle moteur durant l'apprentissage conduit à mettre les participants en situation double-tâche mobilisant plus de ressources.

Les corrélations semblent montrer que les jeunes en condition active ont utilisé des stratégies de navigation basée sur la reconnaissance et le raisonnement inductif, que l'on peut respectivement associer à la reconnaissance des repères et à leur connaissance de séquences de routes pour inférer la bonne route. Cette hypothèse est renforcée par le fait que la condition active a détérioré l'acquisition des connaissances configurationnelles et pas les connaissances de type route (classification des photos). Il semble que la stratégie dans la tâche « wayfinding » basée sur l'utilisation de connaissances de type « route » soit très efficace pour la reconnaissance du trajet en conditions réelles.

Lorsque le facteur âge était contrôlé, la relation entre les scores à la tâche de navigation et toutes les mesures neurocognitives visuospatiales et mnésiques, pour les conditions actives et passives, disparaissait. Ceci confirme le rôle médiateur du déclin lié à l'âge des fonctions visuospatiales et de la mémoire visuospatiale dans les performances de navigation (Taillade et al., 2012; Wolbers & Hegarty, 2010). A cela, le rôle médiateur entre le déclin exécutif et la navigation était plus important après l'apprentissage actif par rapport au passif. Le rôle du déclin exécutif chez les personnes âgées semble donc plus important en condition active que passive.

Une interprétation pourrait être que les personnes âgées ont moins de flexibilité pour changer de stratégie et adopter la plus efficace (utiliser les connaissances de route, plutôt que les connaissances configurationnelles, comme le font les jeunes).

Conclusion et perspectives :

L'ensemble de nos résultats ont permis de montrer de manière directe la relation entre difficultés de navigation chez les personnes âgées et leurs déclinés mnésiques et exécutifs. Ils ont également permis de montrer le rôle important du contrôle moteur à la fois dans les performances de navigation et leurs relations avec les fonctions exécutives.

Nous avons également pu montrer la validité écologique des évaluations de la mémoire spatiale et de la navigation offerte par les outils de réalité virtuelle. Ils indiquent également que les personnes âgées ont des difficultés pour estimer et/ou rapporter leurs difficultés de navigation au quotidien, favorisant ainsi l'utilisation de mesures directes plutôt que les questionnaires. Ces résultats permettent d'envisager des études supplémentaires, notamment lors d'apprentissages spatiaux en condition de marche ou de conduite. En effet, les études portant sur le l'intégration de trajet et son rôle dans la mémoire spatiale et la navigation sont peu nombreuses pour le moment dans le vieillissement (normal ou pathologique). Des études récentes à l'aide de tapis roulants chez les jeunes ont permis de montrer leur importance (Ruddle et al., 2011b ; Larrue et al., 2012) et permettent d'envisager leur étude chez des personnes âgées en utilisant les mêmes techniques. Ceci permettrait de vérifier en plus l'effet double-tâche « cognitif-moteur » dans l'acquisition des niveaux de connaissances spatiales

(repères, route et configurationnel) et dans les performances de navigation déjà suggéré par nos études.

Les applications dans le vieillissement pathologique restent peu nombreuses mais suggèrent différentes pistes d'études comme l'utilisation de tests de mémoire spatiale comme technique de dépistage et de diagnostic précoce de la DTA (Déjos, Sauzéon, & N'Kaoua., 2012) ou le couplage entre imagerie fonctionnelle et navigation des environnements virtuels. Cette dernière application déjà réalisé dans le cas du vieillissement normal mais marginale dans la DTA (Weniger et al., 2011), permettrait à la fois de déterminer le rôle des altérations neuro-fonctionnelles liées à la DTA dans les difficultés de mémoire spatiale de navigation et de montrer la validité des tests de mémoire spatiale ou de navigation comme outil de dépistage ou de diagnostic précoce de la DTA.

En effet, d'autres études réalisées au sein du laboratoire (à l'aide l'application « HOMES » évaluant la mémoire épisodique ou du quartier virtuel de Bordeaux) ont permis de confirmer les profils d'atteintes dans le vieillissement normal et la Démence de type Alzheimer, correspondant aux prédictions du modèle multifactoriel du vieillissement proposant une double origine du vieillissement cognitif (ie., une origine exécutive dominante et une origine mnésique plus modeste) et de la DTA (ie., une origine mnésique dominante et une origine exécutive plus modeste) (REF). Ainsi il semble que le modèle multifactoriel du vieillissement peut être étendu aux situations écologiques (Déjos, thèse de doctorat, 2012).

La validité écologique et le contrôle expérimental fournis par la réalité virtuelle permettrait ainsi une meilleure objectivation à la fois des profils d'atteintes dans les pathologies du vieillissement et une meilleure objectivation de leurs difficultés quotidiennes, toutes deux nécessaires au diagnostic précoce de la DTA. Il semble de plus que la présence de difficultés rencontrées au quotidien soit le meilleur marqueur du vieillissement pathologique, rendant encore plus pertinente l'utilisation d'outils écologiques comme la réalité virtuelle. De plus, la spécificité aux atteintes cognitives que permettent les évaluations par la réalité virtuelle permettrait également leurs applications à d'autres pathologies dans un but de diagnostic différentiel (dépression, démence fronto-temporale...).

Les applications futures offertes par la réalité virtuelle sont donc nombreuses : l'évaluation écologique des troubles de la navigation, de la description des troubles cognitifs à leur origine, l'interaction entre navigation et activités sensorimotrices, le diagnostic précoce et différentiel par l'analyse des profils des déclinis cognitifs et du handicap.

Bibliographie

A

Aguirre, G., & D'Esposito, M. (1999). Topographical disorientation: A synthesis and taxonomy. *Brain*, 122, pp. 1613-1628.

Albert, M. S., Jones, K., Savage, C. R., Berkman, L., Seeman, T., Blazer, D., et al. (1995). Predictors of cognitive change in older persons: MacArthur studies of successful aging. *Psychology and Aging*, 10, pp. 578-589.

Albert, M. S. & Kaplan, E. (1980). Organic implications of neuropsychological deficits in the elderly. In Poon, L. W., Fozard, J. L., Cermack, L. S., Arenberg, D., Thompson L. W. (Eds.), *New directions in memory and aging: Proceedings of the George A. Talland Memorial Conference*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, pp. 403-432.

- Albert, W. S., Reinitz, M. T., Beusmans, J. M., & Gopal, S. (1999). The role of attention in spatial learning during simulated route navigation. *Environment and Planning A*, (31), pp. 1459-1472.
- Aldwin, C. M. Spiro III, A. & Park, C. L. (2006) Health, Behavior, and Optimal Aging: A Life Span Developmental Perspective. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition , pp.85-10
- Algase, D. L., Beattie, E. R. A., Song, J. -A., Milke, D., Duffield, C., Cowan, B. (2004). Validation of the Algase Wandering Scale (Version 2) in a cross cultural sample. *Aging and Mental Health*, 8 (2), pp.133-142.
- Allen, G. (1999). Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding: Bases for individual differences in spatial cognition and behavior. In R. G. Golledge (Ed.): *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*, (pp. 46-80). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Allen, G. L., Kirasic, K. C., Dobson, S. H., Long, R. G., & Beck, S. (1996). Predicting environmental learning from spatial abilities: An indirect route. *Intelligence*, (22), pp. 327-355.
- Allen, G. L., Kirasic, K. C., Rashotte, M. A., & Haun, D. B. (2004). Aging and path integration skill: Kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Perception & Psychophysics*, (66), pp. 170-179.
- Allen, G. L., & Willenborg, L. J. (1998). The need for controlled information processing in the visual acquisition of route knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, (18), pp. 419-427.
- Amouyel, P. (2008). Le vieillissement et ses pathologies en quelques chiffres. In K., Dujardin & P., Lemaire. *Neuropsychologie du vieillissement normal et pathologique*. Elsevier Masson, pp. 3-10.
- Andrés, P., Parmentier, F. & Escera, C. (2006). The effect of aging on involuntary capture of attention by irrelevant sounds: a test of the frontal hypothesis of aging. *Neuropsychologia*, (44), pp. 2564-2568.
- Andersen R., A., Snyder L. H., Bradley D. C., Xing J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neurosciences*, (20), pp. 303-330.
- Anderson, D.C., Yolton, R.L., Reinke, A.R. & Kohl, P. (1995) The dizzy patient: A review of etiology, differential diagnosis, and management. *Journal of the American Optometric Association*, 66 (9), pp. 545-558
- Anooshian, L. J. (1996). Diversity within spatial cognition: Strategies underlying spatial knowledge. *Environment and Behavior*, (28), pp. 471-493.

Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D., & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, (17), pp. 125-143.

Appleyard, D. (1970). Styles and methods of structuring a city. *Environment and Behavior*, (2), pp. 100-118.

Arleo, A., Rondi-Reig, L. (2007). Multimodal sensory integration and concurrent navigation strategies for spatial cognition in real and artificial organisms. *Journal of Integrative Neuroscience*, 6 (3), pp. 327-366

Armstrong, C. L., & Cloud, B. (1998). The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal aging. *Neuropsychology*, 12 (2), pp. 208-217.

Arnsten, A. F. T. (1998). Catecholamine modulation of prefrontal cortical cognitive function. *Trends in Cognitive Sciences*, (2), pp. 436-447

Attree, E. A., Brooks, B. M., Rose, F. D., Andrews, T. K., Leadbetter, A. G., & Clifford, B. R. (1996). Memory processes and virtual environments: I can't remember what was there, but I can remember how I got there. Implications for people with disabilities. [In P. Sharkey (Ed.), *Proceedings of the 1st European Conference on Disability, Virtual Reality, and Associated Technology* (pp. 117-121)]. Reading: University of Reading Press.

B

Bäckman, L. & Dixon, R. A. (1992) Psychological compensation: A theoretical framework. *Psychological Bulletin*, (112), pp. 1-25.

Bäckman, L. & Wahlin, A. (1995) Influences of items organization and semantic retrieval cues on word recall in very old age. *Aging & Cognition*, (2), pp. 312-325.

Bakker, N. H. (2001). *Spatial Orientation in Virtual Environments*. DUP Science Netherlands.

Baldwin, C. L. (2002). Designing in-vehicle technologies for older drivers: Applications of sensory-cognitive interaction theory. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 3 (4), pp. 307-329.

Ball, K., Edwards, J. D. & Ross, L. A. (2007) The impact of speed of processing training on cognitive and everyday functions. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, (62B), pp. 19-31.

Ballesteros, S., Nilsson, L-G. & Lemaire, P. (2009) Ageing, Cognition, and Neuroscience: an introduction. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21 (2&3), pp. 161-175.

Baltes, P. B. (1987). Theoretical propositions of life-span developmental psychology: on the dynamics between growth and decline. *Developmental Psychology*, (23), pp. 611-626

Baltes, M. M., Kuhl, K. P. & Sowaka, D., (1992). Testing for limits of reserve capacity: A promising strategy for early diagnosis of dementia? *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, (47), pp. 4165-167.

- Baltes, P. B. (1993). The aging mind: Potential and limits. *Gerontologist*, (33), pp. 580-594.
- Baltes, P. B., Lindenberger, U. (1997). Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: A new window to the study of cognitive aging ? *Psychology and Aging*, (12), pp. 12-21.
- Baltes, P. B., Staudinger, U. M. & Lindenberger, U. (1999). Lifespan psychology: Theory and Application to intellectual functioning. *Annual Review of Psychology*, (50), pp. 471-507.
- Baltes, P. B. (2006). *Lifespan development and the brain*. Cambridge University Press
- Bardy, B. G. (2006). Perception et régulation du mouvement humain : plaidoyer pour une biologie physique. *Journal de la Société de Biologie*, 200 (2), pp. 135-143.
- Barrash, J. (1994). Age-Related Decline in Route Learning Ability. *Developmental Neuropsychology*, 10, pp.189-201.
- Beauchet, O. & Berrut, G. (2006). Gait and dual-task: Definition, interest, and perspectives in the elderly | [Marche et double tâche: Définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé]. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillessement*, 4 (3), pp. 215-225.
- Birren, J.E., Woods, A.M. & Williams, M.V. (1980) Behavioral slowing with age: Causes, organization, and consequences. In L. W. Poon (Ed.), *Aging in the 1980s*, pp. 293-308.
- Boller, F., Marcie, P. & Traykov, L., (1996) La neuropsychologie du vieillissement normal. In M.I. Botez " (ed.) *Neuropsychologie clinique et neurologie du comportement*. Botez, Montréal: Presses de l'Université de Montréal et Paris, pp. 527-548.
- Boulanger, M. Snyder, P. J. & Cohen, H. (2006). Ralentissement cognitif dans le vieillissement : fonctions exécutives et apprentissage procédural lors d'une tâche informatisée de labyrinthe. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 164 (6), pp. 463-469.
- Bouma, H., Fozard, J. L., Bouwhuis, D. G. & Taipale, V. (2007). Gerontechnology in perspective. *Gerontechnology*, (6), pp. 190-216.
- Braver, T. S. & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In: Craik FIM, Salthouse TA, editors. *The handbook of aging and cognition*. 3rd ed. New York: Psychology Press; pp. 311-372.
- Brooks, B. M., Attree, E. A., Rose, F. D., Clifford, B. R., & Leadbetter, A. G. (1999). The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory*, (7), pp. 65-78.
- Bruce, P. R. & Herman, J. F. (1983). Spatial knowledge of young and elderly adults: scene recognition from familiar and novel perspectives. *Experimental Aging Research*, 9, pp. 169-173.
- Büchner, A. & Jansen-Osmann, P. (2008). Is Route Learning More Than Serial Learning? *Spatial Cognition & Computation*, (8), pp. 289-305

Buckner, R. L. (2004). Memory and executive functions in aging and AD: multiple factors that cause decline and reserve factors that compensate. *Neuron*, 44, pp. 195-208.

Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, (1124), pp. 77-97.

Burns, P. C. (1998). Wayfinding errors while driving. *Journal of Environmental Psychology*, (18), pp. 209-217.

Burns, P. C. (1999). Navigation and the mobility of older drivers. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences* (54), S49-S55.

Byrne, R. W. (1982). Geographical knowledge and orientation. In Ellis AW, editor. *Normality and pathology in cognitive functions*. London: Academic Press; pp. 239-264.

Byrne, P., Becker, S. & Burgess, N. (2007). Remembering the past and imagining the future: a neural model of spatial memory and imagery. *Psychological Review*, (114), pp. 340-375.

C

Cabeza, R. (2004). Neuroscience frontiers in cognitive aging. In R. A. Dixon, L. Bäckman & L. -G. Nilsson (Eds.), *New frontiers in cognitive aging*. New York: Oxford University Press, pp. 179-196.

Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F., & Varotto, D. (2002). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: The effect of efficient exploration. *Cognitive Processing*, (3-4), pp. 65-81.

Carelli, L., Rusconi, M. L., Scarabelli, C., Stampatori, C., Mattioli, F., Riva, G. (2011). The transfer from survey (map-like) to route representations into Virtual Reality Mazes: Effect of age and cerebral lesion. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 8 (6). doi: 10.1186/1743-0003-8-6

Carlsson, G. (2002). Catching the bus in old age-methodological aspects of accessibility assessments in public transport. Doctoral thesis, Lund University Faculty of Medicine.

Carpenter, P. & Just, M. (1986) Spatial ability: An information processing approach to psychometrics, In Sternberg R.J. (ed.) *Advances in the Psychology of Human Intelligence* (third edition) Hillsdale, NJ: Erlbaum, pp. 221-253.

Carroll, J. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. New York: Cambridge University Press.

Cerella, J. (1985). Information processing rates in the elderly. *Psychological Bulletin*, 98, pp. 67-83.

Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (1998). Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence*, (7), pp. 168-178.

- Chao, L. L. & Knight, R. T. (1997). Prefrontal deficits in attention and inhibitory control with aging. *Cerebral Cortex*, 7 (1), pp. 63-69.
- Charness, N. (2008). Aging and human performance. *Human Factors*, 50 (3), pp. 548-555.
- Chown, E., Kaplan, S., & Kortenkamp, D. (1995). Prototypes, location and associative networks (plan): towards a unified theory of cognitive mapping. *Journal of Cognitive Science*, (19), pp. 11-51.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2011a). "What's the difference between active and passive spatial learning?" Poster, Psychonomic Society 52nd Annual Meeting.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2011b). "Spatial navigation: Why is active exploration better than passive exploration?" Poster, Vision Sciences Society Annual Meeting.
- Chrastil, E. R. & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 19 (1), pp. 1-23.
- Christensen, H., Anstey, K. J., Leach, L. S. & MacKinnon, A. J. (2008). Intelligence, education, and the brain reserve hypothesis. In F.I.M. Craik & T.A. Salthouse (Eds.). *The handbook of aging and cognition*, Psychology Press: New York and Hove, pp. 133-188.
- Christou, C. G., & Bühlhoff, H. H. (1999). View dependence in scene recognition after active learning. *Memory & Cognition*, 27, pp. 996-1007.
- Cohen, J. & Cohen, P. (1975) *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Colonia-Willner, R. (1998) Practical intelligence at work: relationship between aging and cognitive efficiency among managers in a bank environment. *Psychology and Aging*, 13, pp. 45-57
- Committeri, G., Galati, G., Paradis, A. L., Pizzamiglio, L., Berthoz, A., & Le Bihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: Different brain areas are involved in viewer-, object-, and landmark-centred judgments about object location. *Journal of Cognitive Neurosciences*, (16), pp. 1517-1535.
- Cowdry, V. E. (1939). *Problems of aging: Biological and medical aspects*. Baltimore, MD: Williams and Wilkins.
- Cronin-Golomb, A. & Amick, M. (2001). Spatial abilities in aging, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease. In F. Boller and S. F. Cappa (Eds.): *Handbook of neuropsychology*, 2 (6), pp. 119-143.
- Cushman, L. A., Stein, K. & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71 (12), pp. 888-895.
- Cutmore, T. R. H., Hine, T. J., Maberly, K. J., Langford, N. M., Hawgood, G. (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human Computer Studies*, 53 (2), pp. 223-249.

Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A. & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: Findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE) Psychology and Aging, (21), pp. 333-352.

D

De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gardini, S. (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology*, 20 (6), pp. 807-821.

de Groot, J. C., de Leeuw, F. E., Oudkerk, M., van Gijn, J., Hofman, A., Jolles, J., et al. (2000) Cerebral white matter lesions and cognitive function: The Rotterdam scan study. *Annals of Neurology*, 47 (2), pp. 145-151.

Deltour, J. J. (1993). Echelle de vocabulaire de Mill Hill de J. C. Raven. Adaptation française et normes européennes du Mill Hill et du Standard Progressive Matrices de Raven (PM 38) [Mill-Hill vocabulary scale of J. C. Raven. French adaptation and European norms]. Braine-le-Chateau, Belgium: Editions L'application des techniques modernes.

Dempster, F. N. (1992) The rise and fall of the inhibitory mechanism: toward a united theory of cognitive development and aging. *Developmental Review*, 12, pp. 45-77.

Dennis, N. A. & Cabeza, R. (2008) Neuroimaging of healthy cognitive aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (3rd ed.) New York: Psychology Press, pp. 1-54.

Dixon, R.A., Garrett, D.D. & Bäckman, L. (2008) Principles of compensation in cognitive neuroscience and neurorehabilitation. In D.T. Stuss, G. Winocur & I.H. Robertson (Eds.), *Cognitive neurorehabilitation* (2nd ed.) Cambridge: Cambridge University Press, pp. 22-38.

Dobson, S. H., Kirasic, K. C. & Allen, G. L. (1995) Age related differences in adults' spatial task performance: Influences of task complexity and perceptual speed. *Aging and Cognition*, 2, pp. 19-38.

Doeller, C. F., King, J. A., & Burgess, N. (2008). Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and boundaries in spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (105), pp. 5915-5920.

Dollinger, S. M. C. (1995) Mental rotation performance: Age, sex, and visual field differences. *Developmental Neuropsychology* 11, pp. 215-222.

Downs, R., & Stea, D. (1973). *Image and the environment*. Chicago: Aldine.

Doumas, M., Smoldes, C. & Krampe, R. T. (2008). Task prioritization in aging: effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Experimental Brain Research* (187), pp. 275-281

Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W. M., Baumgartner, R. N., & Sutherland, R. J. (2003). The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex*, (13), pp. 1344–1351.

Driscoll, I., Hamilton D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior*, 47 (3), 326-335.

Dubois, B., Pillon, B. & Sirigu, A. (1994). Fonctions intégratrices et cortex préfrontal chez l'homme. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.), *Neuropsychologie Humaine*. Bruxelles: Mardaga, pp. 453-459.

E

Easton, R. & Scholl, M. (1995). Object-array structure, frames of reference, and retrieval of spatial knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 21 (2), pp. 483-500.

Ekstrom, R. B., French, J. W., & Harman, H. H. (1976). *Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests*. Princeton, NJ: Educational Testing Service.

Emerson, R.W., (1900). *Compensation*. New York: Caldwell.

Ergis, A-M., Fabre, L. & Behrer, L. (2008) L'entraînement cognitif et le vieillissement normal. In K., Dujardin & P., Lemaire. *Neuropsychologie du vieillissement normal et pathologique*. Elsevier Masson, pp. 219-235.

Etchamendy, N., Konishi, K., Pike, G. B., Marighetto, A. & Bohbot, V. D. (2011). Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: A study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus*. In press.

Etienne, A., Maurer, R., & Seguinot, V. (1996). Path integration in mammals and its interaction with visual landmarks. *Journal of Experimental Biology*, 199 (1), pp. 201-209.

Evans, L. (2004) *Traffic safety*. Bloomfield, MI: Science Serving Society. Fisk, A. D. & Rogers, W. (Eds.) (1997). *Handbook of human factors and the older adult*. San Diego: Academic Press.

F

Farrell, M. J., Arnold, P., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T., & MacManamon, M. (2003). Transfer of route learning from virtual to real environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, (9), pp. 219-227.

Féry, Y., Magnac, R., & Israël, I. (2004). Commanding the direction of passive whole-body rotations facilitates egocentric spatial updating. *Cognition*, (91), pp. B1-B10.

Fisk, A. D., Rogers, W. A., Charness, N., Czaja, S. J. & Sharit, J. (2004) *Designing for older adults: Principles and creative human factors approach*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Fisk, A.D. & Rogers, W.A. (1997) *The handbook of human factors and the older adult*. Academic Press.

Fodor, J.A. (1983) *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT Press.

Foreman, N., Sandamas, G., & Newson, D. (2004). Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction. *Cyberpsychology and Behavior*, 7 (4), pp. 451-457.

Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*, 37, pp. 275-292.

Fuchs, P., Arnaldi, B. & Tisseau, J. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle - 2ème édition, chapitre La réalité Virtuelle et ses applications, Vol 1, pages 3-51, Presses de l'Ecoles de Mines de Paris*.

Fuchs, P., Berthoz, A. & Vercher, J. -L. (2006). Introduction à la Réalité Virtuelle. In [Traité de la Réalité Virtuelle, 1, p. 7]. Transvalor - Presses des Mines (Eds.).

G

Gallistel, C. R. & Cramer, A. E. (1996). Computations on metric maps in mammals, getting oriented and choosing a multi-destination route. *Journal of Experimental Biology*, 199, pp. 211-221.

Gaulin, S. J. C. (1995). Does evolutionary theory predict sex differences the brain? [In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences*, (pp. 1211 – 1225)]. Cambridge, MA7 MIT Press.

Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, (11), pp. 409-420.

Gibson, J. J. (1950). *Perception of the Visual World* (Boston, MA: Houghton Mifflin).

Gillner, S. & Mallot, H. A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of Cognitive Neurosciences*, (10), pp. 445-463.

Golledge, R. G. (1999). Human wayfinding and cognitive maps. [In R. G. Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes* (pp. 5-45)]. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Gomez, A. (2011). Rôle de la mise à jour spatiale égocentrée dans la mémoire épisodique. Unpublished doctoral thesis. Université de Grenoble.

Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Contributions of proprioception to navigation in virtual environments. *Human Factors*, (40), pp. 489-497.

Greenwood, P. M. & Parasuraman, R. (1999). Scale of attentional focus in visual search. *Perception and Psychophysics*, (61), pp. 837-859.

Greenwood, P. (2000). The frontal aging hypothesis evaluated. *Journal of the International Neuropsychological Society* (6), pp. 705-726.

Grön, G., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., Tomczak, R. & Riepe, M. W. (2000). Brain activation during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, (3), pp. 404-408.

Guelfi, J.D. (1996) *L'évaluation clinique standardisée en psychiatrie*. Editions médicales Pierre Fabre, tome II.

Guilford, J. P. & Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford–Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, (32), pp. 24-34.

H

Hahn, J., Lee, K., Lim, S.-L., Kim, S.-Y., Kim, H.-T., Lee, J.-H. (2007). Effects of active navigation on object recognition in virtual environments. *Cyberpsychology and Behavior*, 10 (2), pp. 305-308.

Harris, M. A. & Wolbers, T. (2012). Ageing effects on path integration and landmark navigation. *Hippocampus*, 22 (8), pp. 1770-1780/

Hartley, T., Maguire, E. A., Spiers, H. J. & Burgess, N. (2003). The well-worn route and the path less traveled: Distinct neural bases of route following and wayfinding in humans. *Neuron*, 37 (5), pp. 877-888.

Hasher, L. & Zack, R. T. (1979). Automatic and Effortful processes in memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, (108), pp. 356-388.

Hawn, J. & Delaère, P., (1991). Topographie des lésions. In J. Signoret & J. Hawn (Eds.) *Maladie d'Alzheimer et autres démences*. Paris: Flammarion, pp. 23-38.

Hawthorn, D. (2000). Possible implications of aging for interface designers. *Interacting with Computers*, (12), pp. 507-528.

Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209 (1), pp. 49-58.

Healton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. & Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting Test manual* (rev. ed.). Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.

Hedden, T. & Gabrieli, J. D. E. (2004). Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience* (5), pp. 87-96.

Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Schah & Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking* (pp.121-169). New York: Cambridge University Press.

- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T. & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30 (5), pp. 425-447.
- Hegarty, M. & Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence* (32), pp. 175-191
- Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. [In P. Schah & Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking* (pp.121-169)]. New York: Cambridge University Press.
- Henderson, V. W., Mack, W., & Williams, B. W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Archives of Neurology*, 46, pp. 391-394.
- Herman, J. F., & Coyne, A. C. (1980). Mental manipulation of spatial information in young and elderly adults. *Developmental Psychology*, 16 (5), pp. 537-538.
- Herman, J. F., Kolker, R. G., & Shaw, M. L. (1982). Effects of motor activity on children's intentional and incidental memory for spatial locations. *Child Development*, (53), pp. 239.
- Hofer, S. M. & Sliwinski, M. J. (2006). Design and Analysis of Longitudinal Studies on Aging. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition, pp.14-37.
- Hölscher, C., Meilinger, T., Vrachliotis, G., Brösamle, M., Knauff, M. (2006). Up the down staircase: Wayfinding strategies in multi-level buildings. *Journal of Environmental Psychology*, 26 (4), pp. 284-299.
- Hölscher, C., Büchner, S. J., Meilinger, T., & Strube, G. (2009). Adaptivity of wayfinding strategies in a multi-building ensemble: The effects of spatial structure, task requirements, and metric information. *Journal of Environmental Psychology*, 29 (2), pp. 208-219.
- Hultsch, D. F., Strauss, E., Hunter, M. A. & MacDonald, S. W .S. (2008). Intraindividual variability, cognition and aging. In Craik, F.I . M. & Salthouse, T. (Eds.). *The Handbook of Aging and Cognition* 3rd Edition, Psychological Press, New York and Hove, pp.491-556.
- Hultsch, D. F., MacDonald, S. W. S. & Dixon, R. A. (2002) Variability *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 57B, pp. 101-115.
- Humphries & Prescott, (2010). The ventral basal ganglia, a selection mechanism at the crossroads of space, strategy, and reward. *Progress in Neurobiology* (90), pp. 385-417.
- I
- Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: Variability and change with practice. *Journal of Neuroscience* 23 (13), pp. 5945-5952.

Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196, pp. 187-191.

Iglói, K., Zaoui, M., Berthoz, A., Rondi-Reig, L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, 19 (12), pp. 1199-1211.

Inagaki, H., Meguro, K., Shimada, M., Ishizaki, J., Okuzumi, H., & Yamadori, A. (2002). Discrepancy between mental rotation and perspective-taking abilities in normal aging assessed by Piaget's Three-Mountain Task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24 (1), pp. 18-25.

Ishikawa, T., Fujiwara, H., Imai, O. & Okabe, A. (2008). Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience. *Journal of Environmental Psychology*, (28), pp. 74-82.

Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive Psychology*, 52 (2), pp. 93-129.

Israël, I., Grasso, R., Georges-François, P., Tsuzuku, T., & Berthoz, A. (1997). Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. I. Basic properties. *Journal of Neurophysiology*, 77 (6), pp. 3180-3192.

J

Jacewicz, M.M. & Hartley, A.A. (1987) Rotation of mental images by young and old college students: The effects of familiarity. *Journal of Gerontology*, (24), pp. 396-403.

Jacobs, W. J., Thomas, K. G. F., Laurance, H. E., & Nadel, L. (1998). Place learning in virtual space. *Learning and Motivation*, 29, pp. 288-308.

Jansen, P., Schmelter, A., & Heil, M. (2010). Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Experimental Psychology*, 57 (1), pp. 54-60.

Jastrzemski, T. S. & Charness, N. (2007). The Model Human Processor and the older adult: Parameter estimation and validation within a mobile phone task. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, (13), pp. 224-248.

Jones, C. M., Braithwaite, V. A., & Healy, S. D. (2003). The evolution of sex differences in spatial ability. *Behavioral Neuroscience*, 117, pp. 403-411.

K

Kalia, A. A., Legge, G. E., Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, 37 (11), pp. 1677-1699

Kalová, E., Vlček, K., Jarolímová, E., & Bureš, J. (2005). Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: Corresponding results in real space tests and computer tests. *Behavioural Brain Research*, 159 (2), pp. 175-186.

- Kaussler, D.H. (1991) *Experimental psychology, cognition and human aging*. 2nd Ed. New York, Springer Verlag.
- Kearns, M. J. (2003). *The roles of vision and body senses in a homing task: The visual environment matters* (Unpublished doctoral dissertation). Providence: Brown University.
- Kearns, M. J., Warren, W. H., Duchon, A. P., & Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, (31), pp. 349-374.
- Kennedy, R. S., Berbaum, K. S., & Drexler, J. (1994). Methodological and measurement issues for the identification of engineering features contributing to virtual reality sickness. Paper presented at Image 7 Conference, Tucson, AZ.
- Kelly, J., W. & McNamara, T., P. (2010). Reference frames during the acquisition and development of spatial memories. *Cognition*, (116), pp. 409-420.
- Kimura, D. (2000). *Sex and cognition*. Cambridge, MA7 MIT Press.
- Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychology of Aging*, 6 (1), pp. 10-18.
- Kirasic, K. C., Allen, G. L., & Haggerty, D. (1992). Age-related differences in adults' macrospatial cognitive processes. *Experimental Aging Research*, (18), pp. 33-39.
- Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, (2), pp. 117-134.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. [In C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (Lecture Notes in Artificial Intelligence 1404) (pp. 1-17)]. Berlin: Springer-Verlag.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Beall, A. C., Chance, S. S., & Golledge, R. G. (1998). Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. *Psychological Science*, (9), pp. 293-298.
- Klencken, G., Després, O. & Dufour, A. (2012). What do we know about aging and spatial cognition ? *Reviews and perspectives*. *Ageing Research Reviews* (11), pp. 123-135.
- Klinger, E. (2006). *Apports de la réalité virtuelle à la prise en charge des troubles cognitifs et comportementaux*. Ph D Thesis in Informatique, ENST, Paris, 228 pages, <http://pastel.paristech.org/archive/00001645>.
- Klippel, A., Knuf, L., Hommel, B. & Freksa, C. (2005). Perceptually induced distortions in cognitive maps. In C. Freksa, M. Knauff, B. Krieg-Brückner, B. Nebel, & T. Barkowsky (eds), *Spatial cognition IV: Reasoning, action, interaction* (pp. 204-213). Berlin: Springer.
- Kolb, B. & Whishaw, I. Q. (1990). *Fundamentals of Human Neuropsychology*, chapter 24. In *Spatial Behavior*. W. H. Freeman and Company, third edition, pp. 643-676.

Kosslyn, S. M., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35 (2), pp. 151-161.

Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). A dissociation between object manipulation spatial ability and spatial orientation ability. *Memory and Cognition*, 29 (5), pp. 745-756.

Kozłowski, L. T. & Bryant, K. J. (1977). Sense of direction, spatial orientation, and cognitive maps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, (3), pp. 590-598.

Kramer, A. F., Fabiani, M. & Colcombe, S. J. (2006). Contributions of Cognitive Neuroscience to the Understanding of Behavior and Aging. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition, pp. 57-84.

Kravitz, D. J., Saleem, K. S., Baker, C. I., & Mishkin, M. (2011). A new neural framework for visuospatial processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 12 (4), pp. 217-230

Krauss, I. K. (1989). Testing cognitive skills with playing cards. In J. D. Sinott (Ed.), *Everyday problem solving: Theory and applications* (pp. 238–250). New York, NY: Praeger.

L

Lambrey, S., Doeller, C., Berthoz, A., Burgess, N. (2012). Imagining being somewhere else: Neural basis of changing perspective in space. *Cerebral Cortex*, 22 (1), pp. 166-174

Lapeyre, B., Hourlier, S., Servantie, X., N’Kaoua, B., & Sauzéon, H. (2011). Using the landmark-route-survey framework to evaluate spatial knowledge obtained from synthetic vision systems. *Human Factors*, 53, pp. 647-661.

Latini-Corazzini, L., Nesa, M. P., Ceccaldi, M., Guedj, E., Thinus-Blanc, C., Cauda, F., Dagata, F., Péruch, P. (2010). Route and survey processing of topographical memory during navigation. *Psychological Research*, 74 (6), pp. 545-559.

Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., Newman, M. C., Kaszniak, A. W., Nadel, L., & Jacobs, W. J. (2002). Older adults map novel environments but do not place learn: Findings from a computerized spatial task. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 9 (2), pp. 85-97.

Lee, H. C., Lee, A. H. & Cameron, D. (2003) Validation of a driving simulator by measuring the visual attention skill of olderadult drivers. *American Journal of Occupational Therapy*, 57, pp. 324–328.

Lemaire, P. & Bherer, L. (2005). *Psychologie du vieillissement. Une perspective cognitive*. Bruxelles: De Boeck Université.

Li, K. Z. H, Krampe, R. T. & Bondar, A. (2005). An ecological approach to studying aging and dual-task performance. [In: Engle RW, Sedek G, von Hecker U, McIntosh DN (eds). *Cognitive limitations in aging and psychopathology* (pp 190-218)]. Cambridge University Press, Cambridge, England.

- Li, S. C., Lindenberger, U. & Bäckman, L. (2010). Dopaminergic modulation of cognition across the life span. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 4 (5), pp. 625-630.
- Lindenberger, U., Lovdén, M.; Schellenbach, M., Li, S. C. & Krüger, A. (2008). Psychological principles of successful aging technologies: A mini-review. *Gerontology*, 54 (1), pp. 59-68.
- Lindenberger, U. & Baltes, P. B. (1994). Sensory functioning and intelligence in old age: A strong connection. *Psychology and Aging*, 9 (3), pp. 339-355.
- Lindenberger, U., Marsiske, M., Baltes, P. B. (2000). Memorizing while walking: Increase in dual-task cost from young adulthood to old age. *Psychology and Aging*, 15 (3), pp. 417-436.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child development*, 56 (6), pp. 1479-1498.
- Lipman, P. D. (1991). Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information. *Psychology and Aging*, (6), pp. 128-133.
- Lipman, P. D. & Caplan, L. J. (1992). Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram, *Psychology and Aging*, 7, pp. 435-442.
- Liu, L., Watson, B & Miyazaki, M. (1999). VR for the elderly: Quantitative and qualitative differences in performance with a driving simulator. *CyberPsychology & Behavior*, 2 (6), pp. 567-576.
- Liu, I., Levy, R. M., Barton, J. J. S., Iria, G. (2011). Age and gender differences in various topographical orientation strategies, *Brain Research*, 1410, pp. 112-119.
- Logan, J. M., Sanders, A. L., Snyder, A., Morris, J. C. & Buckner, R. L. (2002). Under-recruitment and non-selective recruitment: Dissociable neural mechanisms associated with aging. *Neuron*, (33), pp. 827-840.
- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. In R. J. Sternberg (Eds.), *Advances in psychology of human intelligence* (pp. 181-248). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Lohman, D. F. (1993). Spatial ability and g. [In I. Dennis & P. Tapsfield (Eds.), *Human abilities: Their nature and measurement*, (pp. 97-116)]. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J. & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environments as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, (31), pp. 557-564.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., & Philbeck, J. W. (1999). Human navigation by path integration. [In R. G. Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes* (pp. 125 – 151)]. Baltimore, MD: Johns Hopkins Press.
- Lorenz, C. A., & Neisser, U. (1986). Ecological and psychometric dimensions of spatial ability (Rep. No. 10). Emory Cognition Project, Atlanta, GA: Emory University.

Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A. & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging*, 20 (4), pp. 683-694.

Lövdén, M., Herlitz, A., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., Lindenberger, U. (2007). Quantitative and qualitative sex differences in spatial navigation: Cognition and Neurosciences. *Scandinavian Journal of Psychology*, 48 (5), pp. 353-358.

M

Maguire, E. A., Woollett, K., & Spiers, H. (2006). London taxi drivers and bus drivers: A structural MRI and neuropsychological analysis. *Hippocampus*, (16), pp. 1091-1101.

Maguire, E. A., Burgess, N., Donnett, J. G., Frackowiak, R. S. J., Frith, C. D., O'Keefe, J. (1998). Knowing where and getting there: A human navigation network. *Science*, 280 (5365), pp. 921-924

Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E., & Moffat, S. D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research*, 205 (1), pp. 88-95.

Mallot, H. (1999). Spatial cognition: Behavioral competences, neural mechanisms, and evolutionary scaling. *Kognitionswissenschaften*, (8), pp. 40-48.

Mancil, G. L. & Owsley, C. (1988). "Vision through my aging eyes" revisited. *Journal of the American Optometric Association*, (59), pp. 288-294.

Mani, T. M., Bedwell, J. S. & Miller, L. S. (2005). Age-related decrements in performance on a brief continuous performance test. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 20, (5), pp. 575-586.

Marquié, J. C., Cau-Bareille, D. P. & Volkoff, S. (Eds.) (1998). *Working with age*. London: Taylor & Francis.

May, M. (2004). Imaginal perspective switches in remembered environments: Transformation versus interference accounts. *Cognitive Psychology*, (48), pp. 163-206.

Mayer, K.U. & Baltes, P.B. (1996) (Eds.) *Die berliner altersstudie [Berlin aging study]*. Berlin, Germany : Akademie Verlag.

McDaniel, M. C., Einstein, G. O. & Jacoby, L. L. (2008). New considerations in aging and memory: The glass may be half full. *The Handbook of aging and cognition*, FIM Craik & TA Salthouse, Psychology Press, (NY.), pp 251-310.

McDowd, J. M. (1997) Inhibition in attention and aging, *Journal of Gerontology: psychological sciences*, 52B (6), pp. 265-273.

McGee, M.G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86 (5), pp. 889-918

McGee, J. S., Van Der Zaag, C., Buckwalter, J. G., Thiebaut, M., Van Rooyen, A., Neumann, U., Sisemore, D., & Rizzo, A. A. (2000). Issues for the assessment of visuospatial skills in

older adults using virtual environment technology. *Cyberpsychology and Behavior*, 3 (3), pp. 469-482.

McGue, M. & Johnson, W. (2008). Genetics of cognitive Aging. In Craik, F.I.M. & Salthouse, T. (Eds.) *Handbook of Aging and Cognition*, 3rd Edition. Psychology Press, New York and Hove, pp. 55-96.

McNamara T. P., Rump B., & Werner S. (2003). Egocentric and geocentric frames of reference in memory of large-scale space. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 10 (3), pp. 589-595

McNamara, T. P., Sluzenski, J., & Rump, B. (2008). Human Spatial Memory and Navigation. [In J. H. Byrne (Ed.), *Learning and Memory: A Comprehensive Reference* (pp. 157-178)]. Oxford: Academic Press.

Meilinger, T. (2008a). Strategies of orientation in environmental spaces. *MPI Series in Biological Cybernetics*, (22), Berlin, Germany: Logos Verlag.

Meilinger, T. (2008b). The network of reference frames theory: A synthesis of graphs and cognitive maps. [In C. Freksa, N. S. Newcombe, P. Gärdénfors, & S. Wölfl (Eds.), *Spatial Cognition VI: Learning, reasoning, and talking about space* (pp. 344-360)]. Berlin, Germany: Springer.

Meilinger, T., Knauff, M., & Bühlhoff, H. H. (2008). Working memory in wayfinding-A dual task experiment in a virtual city. *Cognitive Science*, (32), pp. 755-770.

Mellet, E., Laou, L., Petit, L., Zago, L., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2010). Impact of the virtual reality on the neural representation of an environment. *Human Brain Mapping*, (31), pp. 1065-1075.

Messier, J., Adamovich, S., Jack, D., Hening, W., Sage, J., & Poizner, H. (2007). Visuomotor learning in immersive 3D virtual reality in Parkinson's disease and in aging. *Experimental Brain Research*, 179 (3), pp. 457-474.

Meulemans, T., Collette, F. & Van der Linden, M. (2004) *Neuropsychologie des fonctions exécutives*. Marseille : Solal.

Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B., & Fernández, G. (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage*, (22), pp. 1503-1514.

Michael, W. B., Guilford J. P., Fruchter, B. & Zimmerman, W. S. (1957). The description of spatial visualization abilities. *Education and Psychological Measurement*, 17 (2), pp. 185-199.

Mireles, D.E. & Charness, N. (2002). Computational explorations of the influence of structured knowledge on age-related cognitive decline. *Psychology and Aging*, (17), pp. 245-259.

- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17, pp. 1274-1282.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, pp. 787-796.
- Moffat, S. D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.
- Mohler, J. L. (2006). Examining the Spatial Ability Phenomenon from the Student's Perspective. Unpublished doctoral thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 2006.
- Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's disease: The remembrance of things passed. *Neurology* 61 (11), pp. 1491-1497.
- Money, I., Alexander, D., & Walker, H. T. (1965). Manual: Standardized road-map test of direction sense. Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Montello, D. R. (1993). Scale and multiple psychologies of space. [In A. U. Frank, & I. Campari (Eds.), *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS. Proceedings of COSIT '93. Lecture notes in Computer Science*, 716 (pp. 312-321)]. Berlin7 Springer-Verlag.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environment. [In M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*, (pp. 143-154)]. New York: Oxford University Press.
- Montello, D. R. (2005). Navigation. [In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (pp. 257-294)]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., Self, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American Geographers* 89 (3), pp. 515-534.
- Morganti, F., Marrakchi, S., Urban, P. P., Iannocari, G. A. & Riva, G. (2009). A virtual reality based tool for the assessment of "survey to route" spatial organization ability in elderly population: Preliminary data. *Cognitive Processing*, 10 (suppl. 2), pp. 257-259.
- Morris, R. G. M., Garrud, P., Rawlins, J. N. P., & O'Keefe, J. (1982). Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature*, 297, pp. 681-683.
- Morrow, D. G. & Rogers, W. A. (2008) Environmental Support: An Integrative Framework. *Human Factors*, 50 (4), pp. 589-613.
- Moscovitch, M., Rosenbaum, R. S., Gilboa, A., Addis, D. R., Westmacott, R., Grady, C., McAndrews, M. P., Levine, B., Black, S., Winocur, S., Nadel, L. (2005). Functional neuroanatomy of remote episodic, semantic and spatial memory: A unified account based on multiple trace theory. *Journal of Anatomy*, 207 (1), pp. 35-66

Moffat, S. D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.

Mroczek, D. K., Spiro III, A. & Griffin, P. W. (2006) *Personality and Aging*. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition. pp. 363-378.

N

Neider, Gaspar, McCarley, Schellenbach, Lövdén, Verrel, Crowell, Kaczmarek & Kramer, 2010

Newell, K.M., Vaillancourt, D.E. & Sosnoff, J.J. (2006) *Aging, Complexity, and Motor Performance*. In J. E. Birren & K.W. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition, pp. 163-182.

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), pp. 86-93.

Norman D.A & Shallice, T. (1986) *Attention to action: willed and automatic control of behaviour*. In: R.J. Davidson, G.E. Schwartz and D. Shapiro (Eds.) *Consciousness and self-regulation*, Plenum, New York.

O

O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Owsley, C., Ball, K., Sloane, M. E., Roenker, D. L. & Bruni, J. R. (1991). Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychology and Aging*, (6), pp. 403-415.

P

Packard, M. G. & Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, (25), pp. 563-593.

Pai, M. -C., & Jacobs, W. J. (2004). Topographical disorientation in community-residing patients with Alzheimer's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 19 (3), pp. 250-255.

Park, D.C., Smith, A.D., Lautenschlager, G., Earles, J.L., Frieske, D., Zwahr, M. & Gaines, C.L. (1996) Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychology and Aging*, (11), 4, pp. 621-637.

Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., Rizzo, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42 (4), pp. 555-562.

Passini, R., Rainville, C., Marchand, N., & Joanne, Y. (1995). Wayfinding in dementia of the Alzheimer type: Planning abilities. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, (17), pp. 820-832.

Péruch, P., Vercher, J., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, (7), pp. 1-20.

Péruch, P., & Wilson, P. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, (5), pp. 218-227.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1967). *The child's conception of space* (F. J. Langdon & J. L. Lunzer, Trans.). New York: Norton. (Original work published 1948).

Plancher, G., Nicolas, S., & Piolino, P. (2008). Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: Study in aging. *Psychologie et Neuropsychiatrie du Vieillissement*, 6 (1), pp. 7-22.

Plancher, Gyselinck, Nicolas, & Piolino, (2010). Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology* (24), pp. 379-390.

Plancher, G., Tirard, A., Gyselinck, V., Nicolas S., & Piolino, P. (2012). Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: Influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia* (In Press)

Pollack, M. E. (2005). Intelligent technology for an aging population: the use of AI to assist elders with cognitive impairment. *Ai Magazine*, (26) 2, pp. 9-24.

Porteus, S. D. (1950). *The Porteus Maze Test and intelligence*. Palo Alto, C. A.: Pacific Books.

Poucet, B. (1993). Spatial cognitive maps in animals: new hypotheses on their structure and neural mechanisms. *Psychological Review* (100), pp. 163-182.

Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological Bulletin*, (124), pp. 123-164.

Pringle, H. L., Kramer, A. F. & Irwin, D. E. (2004) Individual differences in the visual representation of scenes. In D. T. Levin (Ed.), *Thinking and seeing: Visual metacognition in adults and children* (pp. 165–186). Cambridge, MA: MIT Press.

Pugnetti, L., Mendozzi, L., Brooks, B. M., Attree, E. A., Barbieri, E., Alpini, D., Motta, A. & Rose, D. F. (1998). Active versus passive exploration of virtual environments modulates spatial memory in MS patients: A yoked control study. *Italian Journal of Neurological Sciences*, 19 (6 suppl), pp. S424-S430

R

Rabbitt, P. M. A. (1990). Applied cognitive gerontology: Some problems, methodologies and data. *Applied Cognitive Psychology*, (4), pp. 223-246.

Rabbitt, P. M. A. (1997). Introduction: Methodologies and models in the study of executive function. In Rabbitt, P. M. A. (Eds.), *Methodology of frontal and executive functions*. Hove, East Sussex: Psychology Press, pp. 1-38.

Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (2003). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 1: General Overview*. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.

- Raz, N., (2000a) Differential aging of the cerebral cortex: Implications for age-related differences in memory. *International Journal of Psychology*, 35 (3-4), pp. 85-93.
- Raz, N. (2000b). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F.I.M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition – II* (pp. 1–90). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Williamson, A., et al. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: General trends, individual differences and modifiers. *Cerebral Cortex*, (15), pp. 1676-1689.
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thiebaut, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25 (8), pp. 1169-1177.
- Regard, M., Strauss, E., & Knapp, P. (1982). Children's production on verbal and non-verbal fluency tasks. *Perceptual and Motor Skills* (55), pp. 839-844
- Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.
- Reuter-Lorenz, P. A. & Lustig, C. (2005). Brain aging: reorganizing discoveries about the aging mind. *Current Opinion in Neurobiology*, (15), pp. 245-251.
- Ribot, T. (1881). *Les maladies de la mémoire*. Paris, Baillière.
- Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & Cognition*, (27), pp. 741-750.
- Riecke, B. E., Cunningham, D. W., & Bühlhoff, H. H. (2007). Spatial updating in virtual reality: The sufficiency of visual information. *Psychological Research*, (71), pp. 298-313.
- Riecke, B. E., Bodenheimer, B., McNamara, T. P., Williams, B., Peng, P., & Feuereissen, D. (2010). Do we need to walk for effective virtual reality navigation? Physical rotations alone may suffice. In C. Holscher, T. Shipley, M. Olivetti Belardinelli, J. Bateman, & N. Newcombe (Eds.), *Spatial cognition VII: Lecture notes in computer science* (pp. 234–247). Berlin: Springer.
- Rieser, J. J., Guth, D. A., & Hill, E. W. (1986). Sensitivity to perspective structure while walking without vision. *Perception*, (15), pp. 173-188.
- Rizzo, A. A. & Buckwalter, J. G. (1997). Virtual reality and cognitive assessment and rehabilitation: The state of the art. [In: G. Riva ed., *Psycho-neuro-physiological Assessment and Rehabilitation in Virtual Environments: Cognitive, Clinical, and Human Factors in Advanced Human Computer Interactions*, (pp. 123-145)], IOS Press: Amsterdam.

Rizzo, A. A., Schultheis, M. T., Kerns, K., & Mateer, C. (2004). Analysis of assets for Virtual Reality applications in Neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation* 14 (1-2), pp. 207-239.

Rodgers, M. K., Sindone, J. A. & Moffat, S. D. (2012). Effects of age on navigation strategy. *Neurobiology of Aging*, 33 (1), pp. 202.e15-202.e22.

Rogers, W. A., (1997). Individual differences, aging, and human factors: an overview. In: Fisk, A.D., Rogers, W.A. (Eds.), *Handbook of Human Factors and the Older Adult*. Academic Press, London, pp. 151-170.

Rose, F. D., Brooks, B. M., & Attree, E. A. (2002). An exploratory investigation into the usability and usefulness of training people with learning disabilities in a virtual environment. *Disability and Rehabilitation*, 24 (11-12), pp. 627-633

Rosenzweig, E. S. & Barnes, C. A. (2003). Impact of aging on hippocampal function: Plasticity, network dynamics, and cognition. *Progress in Neurobiology*, 69 (3), pp. 143-179.

Rubin, E.H., Storandt, M., Miller, P.; Kinscherf, D.A., Grant, E.A., Morris, J.C. & a Berg, L. (1998) A prospective study of cognitive function and onset of dementia in cognitively healthy elders. *Archives of Neurology*, (55) 3, pp. 395-401.

Ruddle, R. A., & Lessels, S. (2009). The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer–Human Interaction*, 16 (1, Art. 5), pp. 1-18.

Ruddle, R. A., Volkova, E., & Bühlhoff, H. H. (2011a). Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer–Human Interaction*, 18(Art. 10), 1–20

Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011b). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory & Cognition*, (39), pp. 686-699.

S

Salthouse, T. A. (1985). Speed of behavior and its implications for cognition. In Birren, J.E., Schaie, K.W. (Eds.), *Handbook of the psychology of aging*. New York: Van Nostrand Reinhold, pp. 400-426.

Salthouse, T. A. (1992). Reasoning and spatial abilities. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): *Handbook of aging and cognition*, (pp. 167-212). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Salthouse, T. A. (1988). Initiating the formalization of theories of cognitive aging. *Psychology & Aging*, 3 (1), pp. 3-16.

Salthouse, T. A. (1996a). Constraints on theories of cognitive aging. *Psychonomic Bulletin and Review*, (3), pp. 287-299.

Salthouse, T.A. (1996b). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, (103), pp. 403-428.

Salthouse, T. A. (1998). Pressing issues in cognitive Aging. In N. Schwartz, D. Park, A. Knäuper & S. Sudman (Eds.) *Cognition, Aging, and Self-reports*. Taylor & Francis group, Philadelphia: Psychology Press, pp. 185-198.

Salthouse, T. A. (2001). A research strategy for investigating group differences in a cognitive construct: Application to ageing and executive processes. *European Journal Of Cognitive Psychology*, 13 (1/2), pp. 29-46.

Salthouse, T. A. (2003). Interrelations of aging, knowledge, and cognitive performance. In Staudinger, U. and Lindenberger, U., (Eds.) *Understanding Human Development: Dialogues with Lifespan Psychology*, Kluwer Academic Publishers, pp. 265–287.

Salthouse, T. A. (2006). Theoretical Issues in the Psychology of Aging. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging.*, 6th Edition, pp. 3-13.

Salthouse, T. A. & Babcock, R. L. (1991). Decomposing adult age differences in working memory. *Developmental Psychology*, (27) 5, pp. 763-776.

Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132 (4), pp. 566-594.

Sandamas, G. & Foreman, N. (2003). Active and passive spatial learning from a desk-top virtual environment in male and female participants: A comparison with guessing controls. *Journal of Health, Social and Environmental*, 4 (2), pp. 15-21.

Sandamas, G. & Foreman, N. (2007). Spatial reconstruction following virtual exploration in children aged 5-9 years: Effects of age, gender and activity-passivity. *Journal of Environmental Psychology*, 27 (2), pp. 126-134.

Sandamas, G., Foreman, N. & Coulson, M. (2009). Interface Familiarity Restores Active Advantage in a Virtual Exploration and Reconstruction Task in Children. *Spatial Cognition & Computation*, 9 (2), pp. 96-108.

Sauzéon, H. (2010). *Approche transdisciplinaire du vieillissement cognitif*. Thèse d'HDR (9 d ec 2010), non publi ee.

Sayers, H. (2004) Desktop virtual environments: a study of navigation and age. *Interacting with Computers*, (16), pp. 939-956.

Schäfer, S., Huxhold, O., & Lindenberger, U. (2006). Healthy mind in healthy body? A review of sensorimotor– cognitive interdependencies in old age. *European Review of Aging and Physical Activity*, (3), pp. 45-54.

Scheidt, R. J. & Windley, P. G. (2006). Environmental Gerontology: Progress in the Post-Lawton Era. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging.*, 6th Edition, pp. 105-128.

- Schellenbach, M., Lövdén, M., Verrel, J., Krüger, A., Lindenberger, U. (2010). Sensorimotor-cognitive couplings in the context of assistive spatial navigation for older adults. *GeroPsych: The Journal of Gerontopsychology and Geriatric Psychiatry*, 23 (2), pp. 69-77.
- Schieber, F. (2006). Vision and Aging. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition, pp. 129-162.
- Schmiedek, F. & Li, S.C. (2004). Towards an alternative representation for disentangling age-associated differences in general and specific cognitive abilities. *Psychology and Aging*, (19), pp. 40-56.
- Schoenfeld, R., Lehmann, W. & Leplow, B. (2010). Effects of age and sex in mental rotation and spatial learning from virtual environments. *Journal of Individual Differences*, 31 (2), pp. 78-82.
- Schultheis, M. T. & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46, pp. 296-311.
- Schultheis, M. T., Himmelstein, J., & Rizzo, A. A. (2002). Virtual reality and neuropsychology: Upgrading the current tools. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, (17), pp. 378-394.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171 (3972), pp. 701-703.
- Scialfa, C. T. & Fernie, G. R. (2006) *Adaptive Technology*. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.). *Handbook of psychology of Aging*. 6th Edition. pp. 426-433.
- Shechtman, O., Classen, S., Stephens, B., Bendixen, R., Belchior, P., Sandhu, M., McCarthy D., Mann, W. & Davis, E. (2007). The impact of intersection design on simulated driving performance of young and senior adults. *Traffic Injury Prevention* 8 (1), pp. 78-86.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. *Science*, 171, pp. 701-703.
- Sholl, M. J., Kenny, R. J., DellaPorta, K. A. (2006). Allocentric-heading recall and its relation to self-reported sense-of-direction. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 32 (3), pp. 516-533.
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. [In H. Reese (Ed.), *Advances in child development and behavior*, 10, (pp. 10-55)]. New York: Academic Press.
- Simoès, A. (2003). The cognitive training needs of older adults. *Recherche, Transport, Sécurité*, 79-80, pp. 145-155.
- Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychology and Aging*, 7 (3), pp. 389-394.
- Sjölander, M., Höök, K., Nilsson, L. G. & Andersson, G. (2005). Age differences and the acquisition of spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an

overview map as a navigation aid. *International Journal of Human-Computer Studies* (63), pp. 537-564.

Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22, pp. 157-175.

Spiers, H. J. (2008). Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia*, 46 (7), pp. 2106-2108

Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17 (8), pp. 618-626.

Spiers, H. J. & Maguire, E. A. (2008). The dynamic nature of cognition during wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 28, pp. 232-249.

Spreng, N. A., Wojtowicz, M. & Grady, C. L. (2010). Reliable differences in brain activity between young and old adults: A quantitative meta-analysis across multiple cognitive domains. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, (34), pp. 1178-1194.

Stern, Y., Alexander, G. E., Prohovnik, I., Stricks, L., Link, B., Lennon, M. C., et al. (1995) Relationship between lifetime occupation and parietal flow: Implications for a reserve against Alzheimer's disease pathology. *Neurology*, (45), pp. 55-60.

Stern, Y. (2002) What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, pp. 448-460.

Spiers, H. J. & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17 (8), pp. 618-626.

Spiers, H. J. & Maguire, E. A. (2008). The dynamic nature of cognition during wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 28 (3), pp. 232-249.

Stankiewicz, B. J., Kalia, A.A. (2007). Acquisition of Structural Versus Object Landmark Knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33 (2), pp. 378-390

T

Taillade, M., Sauzéon, H., Dejos, M., Arvind Pala, P., Larrue F., Wallet, G., Gross, C. & N'Kaoua B. (2012). Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application, *Aging, Neuropsychology, and Cognition* (iFirst). DOI: 10.1080/13825585.2012.706247

Taube, J. S. (1998). Head direction cells and the neurophysiological basis for a sense of direction. *Progress in Neurobiology*, 55 (3), pp. 225-256

Taube, J.S. (2007). The head direction signal: Origins and sensory-motor integration. *Annual Review of Neuroscience*, 30, pp. 181-207

- Tcheang, L., Bühlhoff, H. H., & Burgess, N. (2011). Visual influence on path integration in darkness indicates a multimodal representation of large-scale space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (108), pp. 1152-1157.
- Teng, E., Squire, L. R. (1999). Memory for places learned long ago is intact after hippocampal damage. *Nature*, 400 (6745), pp. 675-677.
- Thier, P., & Karnath, H.O. (1997). *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D Space*. Springer, Berlin.
- Thomas, K. G. F., Laurance, H. E., Luczak, S. E., & Jacobs, W. J. (1999). Age-related changes in a human cognitive mapping system: Data from a computer-generated environment. *Cyberpsychology and Behavior*, 2 (6), pp. 545-566.
- Thomson, D. M. & Perrone, J. A. (2010). Putting New Zealand on the map: Investigating cognitive maps in human navigation using virtual environments. *Journal of vision*, 10 (7), art. 1042.
- Thorndyke, P. W. & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in Spatial Information Acquired from Maps and Navigation. *Cognitive Psychology*, (14), pp. 560-581
- Toglia, J.U. (1975) Dizziness in the elderly. In Fields, W. (ed.) *Neurological and sensory disorders in the elderly*. New York: Grune & Stratton.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review* (55), pp. 189-208.
- Tulving E. (2002) Episodic memory: from mind to brain. *Annual Review of Psychology* (53), pp. 1-25.
- Turano, K. A., Munoz, B., Hassan, S. E., Duncan, D. D., Gower, E.W., Roche, K. B., Keay, L., Munro, C. A., & West, S. K. (2009). Poor sense of direction is associated with constricted driving space in older drivers. *Journals of Gerontology – Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, (64), pp. 348-355.
- Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. [In A. U. Frank & I. Campari (Eds.), *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS* (pp. 14-24)]. Berlin: Springer-Verlag.
- Tversky, B., Morrison, J. B., Franklin, N., & Bryant, D. J. (1999). Three spaces of spatial cognition. *The Professional Geographer* (51), pp. 516-524.
- Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. In A.U. Frank & I. Campari (Eds.), *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS* (pp. 14-24). Berlin: Springer.
- Tversky, B. (2003). Navigating by mind and by body. In C. Freska, W. Brauer, C. Habel, K. F., Wender (Editors), *Spatial Cognition III, Routes and Navigation, Human Memory and Learning, Spatial Representation and Spatial Reasoning*, pp. 1 – 10. Berlin: Springer Verlag.

Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, (47), pp. 599-604.

Vanderhill, S., Hultsch, D. F., Hunter, M. A., & Strauss, E. (2010). Self-reported cognitive inconsistency in older adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, (17), pp. 385-405.

Verhaeghen, P. & Salthouse, T. (1997) Meta-analyses of age-cognition relations in adulthood: Estimates of linear and nonlinear age effects and structural models. *Psychological Bulletin*, 122 (3), pp. 231-249.

Verrel, J., Lövdén, M., Schellenbach, M., Schaefer, S., Lindenberger, U. (2009). Interacting Effects of Cognitive Load and Adult Age on the Regularity of Whole-Body Motion During Treadmill Walking. *Psychology and Aging*, 24 (1), pp. 75-81

Vogler, G. P. (2006); Behavior Genetics and Aging. In J. E. Birren & KW. Schaie (Eds.) *Handbook of psychology of Aging*, 6th Edition. Elsevier Academic Press, pp.14-37.

Von Stülpnagel, R., & Steffens, M. C. (2012). Can Active Navigation Be as Good as Driving? A comparison of spatial memory in drivers and backseat drivers. *Journal of Experimental Psychology: Applied*. Advance online publication.

Voss, J. L., Gonsalves, B. D., Federmeier, K. D., Tranel, & D., Cohen, N. J. (2011). Hippocampal brain-network coordination during volitional exploratory behavior enhances learning. *Nature Neuroscience*, 14 (1), pp. 115-122.

Voyer, D., Voyer, S. & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117 (2), pp. 250-270.

W

Waller, D., Bachmann, E., Hodgson, E., & Beall, A. C. (2007). The HIVE: A huge immersive virtual environment for research in spatial cognition. *Behavior Research Methods*, 39 (4), pp. 835-843.

Waller, D., & Greenauer, N. (2007). The role of body-based sensory information in the acquisition of enduring spatial representations. *Psychological Research*, (71), pp. 322-332.

Waller, D. & Lippa, Y. (2007). Landmarks as beacons and associative cues: Their role in route learning. *Memory & Cognition*, 35 (5), pp. 910-924

Waller, D., Loomis, J. M., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin and Review*, 11 (1), pp. 157-163.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer: Effects of passive/active exploration mode in simple and complex routes for three different recall tasks. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, pp. 175-178.

- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject’s strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6, pp. 572-574.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N’Kaoua, B. (2010). Virtual/real transfer of spatial learning: Impact of activity according to the retention delay. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 8, pp. 115-118.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N’Kaoua, B. (2011). Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, (14), pp. 417-423.
- Wang, R. F., & Simons, D. J. (1999). Active and passive scene recognition across views. *Cognition*, (70), pp. 191-210.
- Wechsler, D. (1997). *WAIS-III Administration and Scoring Manual*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. New York, NY: Psychological Corporation.
- Welford, A. T. (1964). *Vieillissement et aptitudes humaines*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Wenger, M. J. & Schuster, C. (2007) *Statistical and process models for cognitive neuroscience and aging*. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, 120, pp. 272-292.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M. & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*,(68), pp. 77-94.
- Whitbourne, S. (1998). Physical changes in the aging individual. In Nordhus, I.H., Vandenbos, G. R., Berg, S., Fromholt, P. (Eds.) *Clinical geropsychology*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Wiener, J., Büchner, S., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, 9 (2), pp. 1-14.
- Wiener, J. M., & Mallot, H. A. (2003). Fine-to-coarse route planning and navigation in regionalized environments. *Spatial Cognition and Computation*, 3 (4), pp. 331-358.
- Wilkniss, S. M., Korol, D. L., Gold, P. E., Jones, M. G., & Manning, C. A. (1997). Age-related differences in an ecologically based study of route learning. *Psychology and Aging*, 12 (2), pp. 372-375.

Wilson, P., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active versus passive processing of spatial information in a computersimulated environment. *Ecological Psychology*, (9), pp. 207-222.

Wolbers, T., & Hegarty, M., (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (3), pp. 138-146.

Wolbers, T., Weiller, C., & Büchel, C. (2004). Neural foundations of emerging route knowledge in complex spatial environments. *Cognitive Brain Research*, 21 (3), pp. 401-411.

Woolley, D. G., Vermaercke, B., de Beeck, H. O., Wagemans, J., Gantois, I., D'Hooge, R., Swinnen, S. P. & Wenderoth, N. (2010). Sex differences in human virtual water maze performance: Novel measures reveal the relative contribution of directional responding and spatial knowledge. *Behavioural Brain Research*, 208 (2), pp. 408-414.

Wraga, M., Creem-Regehr, S. H., & Proffitt, D. R. (2004). Spatial updating of virtual displays during self- and display rotation. *Memory & Cognition*, (32), pp. 399-415.

Y

Yeap, W. K. & Jefferies, M. F. (2001). On early cognitive mapping. *Spatial Cognition and Computation* (2), pp. 85-116.

Yetka, A.A., Pickwell, L.D. & Jenkins, T.C. (1998) Binocular vision: Age and symptoms. *Ophthalmic Physiological Optics*, 9, pp. 115-120.

Z

Zacks, J.M., Vettel, J.M.,Michelon, P. (2003). Imagined Viewer and Object Rotations Dissociated with Event-Related fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15 (7), pp. 1002-1018

Zajicek, M., (2003) Patterns for encapsulating speech interface design solutions for older adults. *Proceedings of the 2003 ACM Conference on Universal Usability (CUU03)*, 10–11 November, Vancouver, Canada, pp. 54-60.

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), pp. CR140-CR150.

Table des illustrations

Figures

Figure 1: Evolution du nombre (en milliers) de personnes âgées en France et du pourcentage de personnes âgées de plus de 65 ans (par rapport à la population totale) en France de 1950 à 2050	12
Figure 2 : Illustration de l'hétérogénéité du vieillissement cognitif (données issues de l'étude de Rubin et al., 1998)	14
Figure 3 : Facteurs influençant le vieillissement neuro-cognitif en termes de déclin ou de vieillissement réussi (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005)	14
Figure 4: Phasage de la méthode d'analyse des différences liées à l'âge sur la cognition selon Salthouse (2001, 2006)	15
Figure 5 : Scénario de la vieillesse.....	17
Figure 6 : Schématisation des modèles structuraux ou hypothèse multiples du vieillissement cognitif.....	19
Figure 7 : Corrélations entre mesures perceptives (visuelles et auditives) et mesures cognitives sur deux groupes d'âge (Baltes & Lindenberger, 1997)	19
Figure 8 : Lésions de la substance blanche (SB) corrélée au déclin mnésique de la personne âgée.....	23
Figure 9: Schématisation des deux facteurs indépendants (Frontal-Striatal et Medio-Temporal) influençant séparément ou de manière combinée le déclin cognitif associé au vieillissement en termes de dysexécutivité et de déclin mnésique (d'après Buckner, 2004)	24
Figure 10 : Théorie neurocognitive du déficit sensoriel et cognitif selon 3 hypothèses (Dennis & Cabeza, 2008)	26
Figure 11a: Nombre d'articles publiés dans Human Factors concernant l'âge ou le vieillissement depuis 2007. (d'après Charness, 2008a)	27
Figure 11b: « Top 10 » des publications (en termes de nombre de citations depuis 2007, et nombre moyen de citations/an) dans « Human Factors » d'après Charness, 2008a)	27
Figure 12 : Modèle de l'activité « Personne-Environnement » au niveau individuel et sociétal (selon Carlsson, 2002)	30
Figure 13 : Modèle de l'étendue d'utilisation d'un ordinateur avec les coefficients de régression standardisés (d'après Cazaja, et al., 2006)	30
Figure 14 : Description et propriétés des représentations spatiales égocentriques (corps-objet) et allocentriques (objet-objet) (Easton & Sholl, 1995)	33
Figure 15 : Figures développées pour le test de rotation mentale. Dans la version de Vandenberg, Kuse et Vogler (1978), il faut déterminer parmi les 4 figures de droite, celles qui sont identiques à la figure se trouvant à gauche.....	34

Figure 16 : Test d'orientation spatiale de Guilford & Zimmerman (Guilford & Zimmermann, 1945)	35
Figure 17 : a - Exemple d'item utilisé pour un test de prise de perspective mentale ; b - Exemple de réponses données pour ce test de prise de perspective mentale (Hegarty & Waller, 2004).....	36
Figure 18 : Représentation schématique des processus nécessaires à l'apprentissage et la navigation dans des grands espaces (Hegarty et al., 2006)	37
Figure 19 : Description des modèles de relations entre les aptitudes à grande et petite échelle (Hegarty et coll., 2006)	38
Figure 20 : (A) Résultat de l'analyse structurale de Hegarty et al. (1996) ; (B) Modèle de dissociation partielle issu de l'analyse structurale.....	38
Figure 21 : Modèle à médiation (analyse de pas) proposé par Allen et al. (1996).	39
Figure 22 : Vue d'ensemble des aptitudes associées à la navigation et l'apprentissage dans des grands espaces (Wolbers & Hegarty, 2010)	40
Figure 23 : Représentation schématique de la hiérarchisation des positions et des connexions des routes formant un réseau (Golledge, 1999)	41
Figure 24 : Représentation schématique des prédictions de modèles « dominant » (de Siegel & White, 1975) et « continu » (de Montello, 1998) du développement des représentations spatiales (Ishikawa & Montello, 2006)	43
Figure 25 : Représentation de la « Network of Reference Frame Theory » (Meilinger, 2008)	44
Figure 26 : Tâche de complétion de triangle utilisée classiquement pour l'étude de l'intégration de trajet (Mahmood et coll., 2009)	46
Figure 27 : Représentation schématique de la taxonomie des activités de type « Wayfinding » proposée par Wiener et coll. (2009)	51
Figure 28 : Taxonomie des stratégies de navigation proposée par Arleo & Rondireig (2007).....	52
Figure 29 : Modèle de navigation proposé par Burns (1998) s'appliquant à la conduite automobile.....	52
Figure 30 : Représentation schématique du modèle de navigation proposé par Ishikawa, Fujiwara, Imai & Okabe (2008)	53
Figure 31 : Représentation schématique du modèle de navigation et d'orientation spatiale proposé par Bakker (2001)	54
Figure 32 : Modèle schématique d'interaction temporo-pariétale impliqués dans la mémoire spatiale et l'imagerie mentale. (Byrne et al., 2007)	55
Figure 33 : Relation entre validité écologique et contrôle expérimental pour les méthodes traditionnelles (outils classiques de type papier-crayon, informatisés et les dispositifs virtuels (Loomis et al., 1999)	58
Figure 34 : Hôpital virtuel utilisé par Cushman et al., (2008)	63

Figure 35 : Exemple de version virtuelle d'un labyrinthe radiaire utilisé par Etchamendy et al., 2011.....	63
Figure 36 : A- Vue du quartier St Augustin « réel » ; B- Vue de la version virtuelle du quartier St Augustin ; C- Schémas du Parcours utilisé ; D- Vue générale du quartier virtuel.....	74

Tables et tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des hypothèses et fait marquants du vieillissement cognitif (d'après Sauzéon, 2010)	23
Tableau 2 : Lésions de la substance grise (SG) liées à l'âge prépondérantes sur le cortex frontal, les noyaux gris centraux et l'hippocampe (selon la méta-analyse de Raz, 2000)	23
Tableau 3 : Opérationnalisation des patterns d'activation neuro-fonctionnelle en termes d'hypo-/hyper-activation et de niveau de performances atteint (d'après Reuter-Lorent & Listig, 2005)	25
Tableau 4 : Récapitulatif de l'activation de la région frontale/préfrontale chez les sujets jeunes et âgés dans diverses tâches cognitives (d'après Cabeza, 2004)	26
Tableau 5 : Déclins, difficultés et compensation pour la conduite automobile (d'après Simeos, 2003)	29
Tableau 6 : Diversité des facteurs visuo-spatiaux identifiés, utilisant des approches par analyses factorielles (d'après Hegarty & Waller, 2005)	34

<u>Tableau 7</u> : Résumé des études portant sur les corrélations entre les aptitudes spatiales à petite et à grande échelle (Hegarty & Waller, 2005)	36
<u>Tableau 8</u>: Récapitulatif des études sur le rôle des informations idiothétiques (copies efférentes motrices, infos proprioceptives et vestibulaires) dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale	48
<u>Tableau 9</u> : Récapitulatif des études sur le rôle des copies efférentes motrices, dans la mémoire spatiale, l'intégration de trajet et la mise à jour spatiale	48
<u>Tableau 10</u> : Avantages de la réalité virtuelle dans la rééducation cognitive (d'après Shulteis et Rizzo, 2001)	58

Annexes

Cognition spatiale et vieillissement : les nouveaux éclairages offerts par les études utilisant la réalité virtuelle.

[Spatial cognition and Aging: new insights provided by Virtual Reality-based studies.]

L'année psychologique
(Soumis)

Taillade, M., Sauzéon, H., Dejos, M., Arvind Pala P., Gross, C., & N'Kaoua, B.

Résumé

L'étude des effets du vieillissement sur la cognition spatiale connaît un développement important ces dernières années avec l'arrivée des technologies de la Réalité Virtuelle (RV)

qui permettent de simuler des activités de navigation dans des environnements écologiques à grande échelle. Les récents résultats obtenus par cette nouvelle voie d'investigation sont présentés avec un volet dédiés aux travaux portant sur les mécanismes à l'origine des difficultés d'apprentissage et de navigation dans les petits et grands espaces au cours du vieillissement « normal » et dans la Démence de Type Alzheimer (DTA). Egalement, sont présentées les quelques études s'intéressant aux troubles visuels, visuo-moteurs et visuo-spatiaux à petite échelle dans la Maladie de Parkinson (MP). Les avancées permises par la RV sont exposées ainsi que les perspectives de recherche à venir, en particulier l'étude des relations entre cognition et action, mais aussi l'exploration des bases neuronales de la cognition spatiale grâce au couplage entre RV et imagerie fonctionnelle.

Mots-clés : Réalité virtuelle ; Cognition spatiale ; Vieillesse cognitive ; Démence de type Alzheimer ; Maladie de Parkinson.

Abstract:

Since few years, the study of spatial cognition and its decline with aging is taking significant development with the introduction of technologies of Virtual Reality (VR), simulating everyday navigation activities in naturalistic environments. The aim of this review issue was to describe the recent results obtained by this new way of investigation, in the domain of the mechanisms of spatial learning and navigation difficulties in normal aging and the Dementia of the Alzheimer Type (DAT). Furthermore, the few results are presented relatively to studies examining visual, small scale visuo-spatial abilities in Parkinson's disease (PD). This review highlights the recent advances allowed by Virtual Reality and the perspectives of the next researches, particularly in the domains of the study of the relations between cognition and action, as well as the neural correlates of spatial cognition allowed by the association between VR and cerebral functional imaging.

Key-words: Virtual reality, Spatial Cognition, Cognitive aging, Dementia of the Alzheimer Type, Parkinson's disease.

Introduction

Primordiales à l'autonomie, les activités de déplacements et de navigation dans les grands espaces et leur restriction constituent un des enjeux majeurs de l'étude du vieillissement neurocognitif et de ses répercussion sur les activités quotidiennes de la personne, et notamment dans le cadre du dépistage d'un syndrome démentiel (Algase et coll. 2004 ; Henderson, Mack & Williams, 1989; Monacelli, Cushman, Kavcic & Duffy, 2003; Pai & Jacobs, 2004). De nombreuses études se sont consacrées à la cognition spatiale de la personne âgée avec ou sans maladie neurodégénérative (eg., démence de type Alzheimer), et l'introduction des applications de Réalité Virtuelle (RV), notamment rendue possible par les progrès des interfaces Homme-Machine plus adaptées aux utilisateurs âgés, a permis des avancées considérables dans ce domaine depuis ces dernières années. En effet, la RV en simulant une locomotion (avancer, reculer, aller à droite, à gauche, tourner sur soi) dans de grands espaces réalistes en 3 dimensions (quartier, maison, hôpital, supermarché, ...), offre une nouvelle voie d'investigation de la cognition spatiale du sujet âgé, assurant des conditions d'étude à la fois contrôlées et sécurisées pour la personne tout en étant proches de situations réelles de navigation dans les grands espaces (Loomis, Blascovich & Beall, 1999 ; Wilson, 1997).

Avant de renseigner ces avancées, nous proposons dans un premier temps d'exposer les fondements théoriques et empiriques de la cognition spatiale avec notamment les résultats en lien avec la distinction entre cognition spatiale à petite vs. grande échelle, et ceux relatifs à l'articulation entre la composante cognitive et la composante motrice dans la construction des représentations spatiales (d'un environnement) nécessaire à l'activité de navigation.

Cognition spatiale

La cognition spatiale est décrite par Lohman (1993) comme « l'ensemble des mécanismes à l'origine de nos aptitudes à générer, retenir, récupérer et transformer une image visuelle bien structurée pour guider nos comportements dans l'espace ». Ces aptitudes ne représenteraient pas un facteur unique et ont été classées en différentes composantes, dont le nombre et la description varient selon les auteurs et les approches (psychométriques, développementales ou neuropsychologiques ; pour revue, voir; Allen, 1999 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Mohler, 2006 ; Voyer, Voyer & Bryden, 1995). Une distinction importante a été faite entre les *aptitudes spatiales à petite échelle* (généralement de type « papier crayon » nécessitant la visualisation et la manipulation mentale d'objets : tests de rotation mentale¹⁴, tests de Guilford & Zimmermann¹⁵, prise de perspective mentale¹⁶ par exemple) et à *grande échelle*, pouvant prendre différentes terminologies selon les auteurs (navigation et apprentissage dans de grands espaces, aptitudes « macro-spatiales », capacités visuo-spatiales « à échelle environnementale ») (Allen, 1999 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa & Lovelace, 2006 ; Lorenz & Neisser, 1986 ; Montello, 1993 ; Siegel & White, 1975).

Cette distinction trouve sa justification dans les faibles corrélations observées entre les tests visuo-spatiaux de type « papier-crayon » évaluant les capacités visuo-spatiales à petite échelle et les performances d'apprentissage et de navigation dans des grands espaces (pour revue voir, Hegarty & Waller, 2005). Les tests sur « papier » de manipulation mentale d'objets souffriraient donc d'une faible validité écologique et seraient faiblement prédictifs des difficultés d'apprentissage et de navigation au quotidien (Hegarty & Waller, 2005 ; Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa & Lovelace, 2006 ; Lorenz & Neisser, 1986). Cela revient à dire que la navigation dans les grands espaces nécessite des aptitudes autres que celles requises pour les tests de type « papier-crayon ». En particulier, elle mobiliserait des mécanismes propres à son caractère dynamique : le développement de différents niveaux de représentations spatiales, l'intégration d'informations relatives aux mouvements du corps (mécanisme appelé « intégration de trajet »), l'utilisation de représentations à long terme pour la planification de trajets dans un espace donné (« Wayfinding »), etc. (pour revue, voir Allen, 1999 ; Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener, Büchner, & Hölscher, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010).

Si cette distinction « petite vs grande échelle » semble admise, des débats demeurent, en particulier sur la nature des relations qu'entretiennent ces deux classes d'aptitudes visuo-spatiales (Hegarty et al., 2006): modèles unitaires (pas de dissociation, les processus sont communs entre tests visuo-spatiaux à petite échelle et navigation dans de grands espaces) (Gaulin, 1995, Kimura, 2000 ; Jones, Braithwaite, & Healy, 2003) ; modèle de dissociation

¹⁴Le test de rotation mentale consiste à déterminer si deux figures en 3 dimensions, tournées différemment dans l'espace, sont identiques ou sont miroirs l'une de l'autre (Shepard & Meltzer, 1971).

¹⁵Le test Guilford & Zimmermann comporte e deux parties : la partie 5, appelée test d'orientation spatiale, a pour but de décrire le mouvement d'un bateau dans un paysage, par rapport à un point de mire imaginaire. La partie 6, appelée test de visualisation spatiale, a pour but de donner la position finale d'une horloge après des mouvements indiqués par un cadran (Guilford & Zimmermann, 1948).

¹⁶La prise de perspective mentale représente l'aptitude à imaginer l'apparence d'une scène visuelle selon un point de vue différent de celui occupé par le sujet (May, 2004) et semble partiellement dissociable des capacités de rotation mentale d'objets (Kozhevnikov & Hegarty, 2001).

(totale ou partielle, eg.,: Montello, 1993; Tversky, Morrison, Franklin, & Bryant, 1999) ou encore modèle à médiation (où la relation entre ces aptitudes est expliquée par un autre facteur, comme l'encodage d'information visuelle et son maintien en mémoire de travail communs aux deux classes d'aptitudes eg., Hegarty et al., 2006).

Parmi les modèles les plus anciens de la cognition spatiale dans les grands espaces adressant la construction dynamique des représentations spatiales, le modèle de Siegel & White (1975) (modèle « L-R-S ») a longtemps fait référence. Il propose que l'acquisition de la connaissance d'un nouvel espace se fasse en trois étapes, avec un premier niveau correspondant à l'acquisition des repères (« Landmark » en anglais), puis un niveau représentationnel de type « Route », correspondant à une série de positions associées à une décision ou à un changement de direction (Allen, 1999; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982 ; Wolbers, Weiller & Büchel, 2004), et enfin, un niveau de connaissance spatiale permettant une représentation de type configurationnelle (« Survey », en anglais) associé au concept de carte cognitive (O'Keefe & Nadel, 1978; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Si cette première formulation de Siegel et White contraint à une sérialité et à une hiérarchie des connaissances spatiales, les modèles les plus récents proposent que le développement de ces connaissances spatiales soit mené en parallèle, et que les informations métriques (nécessaires au développement du niveau « Survey »), puisse être acquises dès les premiers apprentissages (voir Montello, 1998; Ishikawa & Montello, 2006; Meilinger, 2008). Il y aurait, en fait, de grandes différences individuelles dans l'acquisition du niveau de connaissance de type « Survey », qui ne serait atteint que par les personnes ayant un bon sens de l'orientation (Hegarty et coll., 2006; Ishikawa & Montello, 2006; Kozlowski & Bryant, 1977; comme modèle récent, voir aussi Meilinger, 2008).

Le développement des technologies de la Réalité Virtuelle a permis de nombreuses avancées dans l'étude des mécanismes associés à la cognition spatiale dans les grands espaces. Différents domaines ont été abordés : l'étude des stratégies de navigation dans des labyrinthes ou dans des environnements plus réalistes, l'étude des corrélats neuro-anatomiques de la mémoire spatiale et la navigation, et enfin, les mécanismes d'intégration de trajet avec l'étude du rôle des informations sensorimotrices dans la cognition spatiale dans des grands espaces.

Des études à l'aide de labyrinthes chez l'homme (Etchamendy & Bohbot, 2007; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003; Iglò, Zaoui, Berthoz & Rondi-Reig, 2009) décrivent deux grandes stratégies de navigation, la première appelée « *égocentrique* » et la seconde appelée « *allocentrique* ». La stratégie « *égocentrique* » (également appelée « *procédurale* ») reposerait sur l'utilisation de représentations de type « stimulus-réponse » qui dépendrait principalement du fonctionnement du noyau caudé (Packard & Knowlton, 2002). Cette stratégie est parfois associée à la mémorisation et l'utilisation de connaissances de type « route ». A la différence, la stratégie allocentrique de navigation reposerait sur l'utilisation d'une représentation de type carte cognitive (allocentrique), dépendante principalement de l'hippocampe (O'Keefe and Nadel, 1978 ; Burgess, 2008). Cette distinction a été également validée dans des situations plus réalistes (ville virtuelle ; Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003). D'autres études se sont intéressées aux stratégies de navigation dans des situations plus réalistes et s'adressent à ce qui est appelé en anglais « *Wayfinding* » (Passini, Rainville, Marchand, & Joanne, 1995; Montello, 2005 ; Wiener, et al., 2009 ; Wiener & Mallot, 2003 ; Spiers & Maguire, 2008). Malgré des différences entre les modèles, ils s'accordent tous à considérer que la navigation nécessite de sélectionner des routes, de planifier et exécuter un trajet d'une position à une autre, en utilisant les connaissances acquises de l'environnement (de type route ou/et « *survey* ») (Allen, 1999 ; Bakker, 2001 ; Spiers & Maguire, 2008 ; Wiener et al., 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010), statuant ainsi de manière consensuelle sur le

rôle de la mémoire spatiale et du fonctionnement exécutif dans les performances de navigation.

Dernièrement, les études couplant les dispositifs de réalité virtuelle aux systèmes de neuro-imagerie fonctionnelle ont permis d'indiquer que l'apprentissage et la navigation spatiale dans des grands espaces couvrent un circuit neuronal large, incluant l'hippocampe, le gyrus parahippocampique, le cortex pariétal et le gyrus cingulaire postérieur (pour revue, voir Burgess, 2008 et Spiers & Maguire, 2007 ; par exemple). L'étude de Latini-Corazzini, Nesa, Ceccaldi, Guedj, Thinus-Blanc, Cauda et al. (2010) montre que ce large réseau impliquerait en plus l'aire motrice supplémentaire, l'insula et le noyau caudé spécifiquement associées à la mémoire de route ou aux stratégies de navigation « *égocentriques* ». Le cortex préfrontal jouerait également un rôle, notamment dans le calcul de la proximité du but, dans la planification et le contrôle nécessaires à la navigation, ainsi que dans le maintien du but en mémoire de travail (Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003; Maguire, Burgess, Donnett, Frackowiak, Frith, & O'Keefe, 1998 ; pour revue voir Spiers, 2008).

Enfin, les études en RV s'intéressent également au rôle des informations sensori-motrices dans la cognition spatiale au travers l'étude des mécanismes d'intégration de trajet. Le rôle des informations sensori-motrices a été particulièrement décrit dans le cadre d'un mécanisme appelé « intégration de trajet » (« *Path integration* », en anglais ; Gallistel & Cramer, 1996; Loomis, Klatzky, Golledge & Philbeck, 1999; par exemple). Trois sources d'informations seraient utilisées (Hegarty et al., 2006 ; Israël, Grasso, Georges-François, Tsuzuku, & Berthoz, 1997; Loomis, Klatzky, Golledge & Philbeck, 1999 ; Waller, Loomis, & Haun, 2004 ; Chrastil & Warren, 2012) : le flux optique, défini comme les entrées visuelles dynamiques relatives aux mouvements des formes, des textures, des points de repères d'objets, etc. (Gibson, 1950) ; les stimulations émanant du système vestibulaire, et celles d'origine kinesthésique, correspondant au retour proprioceptif en provenance des muscles et des tendons, ainsi qu'aux copies efférentes des commandes motrices venant des aires cérébrales motrices (Bardy, 2006; Kearns, Warren, Duchon, & Tarr, 2002). Des études en RV ont montré que chacune de ces trois sources d'information sensorimotrices lors d'un déplacement ambulatoire contribuaient à améliorer la performance des sujets sur des tâches de navigation (« *Wayfinding task* », Riecke et al., 2010; Ruddle et al., 2011a; Ruddle et al., 2011b ; Wallet et al., 2009 ; 2010 ; 2011) mais aussi sur des tâches évaluant leur mémoire spatiale en termes de connaissances spatiales de type « configurationnelle/Survey » (Chance et al., 1998; Waller et al., 2004 ; Wallet et al., 2009 ; 2010 ; 2011) ou de type "Route" (Riecke et al., 2010; Ruddle et al., 2011a; Ruddle et al., 2011b ; Wallet et al., 2009 ; 2010 ; 2011). Néanmoins, comme soulignés par Chrastil & Warren (2012), le rôle respectif de chaque source d'information sensori-motrice reste à être mieux défini, et selon les mêmes auteurs, les études utilisant la RV permettront des avancées certaines dans ce domaine grâce à la diversité des interacteurs (joystick, tapis roulant,...) et des interfaces (écran, visuo-casques...), qui offre des conditions expérimentales favorables à la capture sélective des différentes informations relatives aux mouvements du corps (eg., privation sensorielle).

A côté de ces études, d'autres études en RV s'intéressent aux variables dites « médiatrices » de la cognition spatiale comme les fonctions attentionnelles, la mémoire de travail ; la prise de décision (pour revue, Chrastil & Warren, 2012.). Concernant les variables médiatrices attentionnelles, sur la base de tâches d'orientation attentionnelle ou encore de comparaisons entre des apprentissages intentionnels et incidents (les premiers étant supposés comme plus « attentionnels ») (pour revue, Chrastil & Warren, 2012), il a été montré qu'un apprentissage incident est suffisant pour se constituer un niveau de connaissance de type « repères » ; en revanche, des connaissances spatiales élaborées d'un environnement (de type « route » ou « survey-configurationnelles ») requièrent un apprentissage intentionnel et une attention orientée sur les relations entre éléments saillants de l'environnement, et ceci de

manière proportionnelle à la complexité de l'environnement (eg., Rodrigues & Marques, 2006 ; Magliano, Cohen, Allen, and Rodrigue, 1995). Le rôle de la mémoire de travail (Baddeley, 2003) a été aussi étudié en utilisant par exemple les techniques de double tâche. Une tâche secondaire quelle que soit sa nature (verbale ou spatiale) ne perturberait pas l'acquisition du niveau « repère ». Par contre, elle perturberait les tâches évaluant les niveaux « route » et « configurationnel/survey » (Albert et al., 1999; Anoshian & Seibert, 1996 ; Allen & Willenborg, 1998), voire même interférerait avec les mécanismes d'intégration de trajet (Tcheang et al., 2011), et ceci qu'elles soient de nature verbale et visuo-spatiale. Ces résultats suggèrent que les deux derniers niveaux d'acquisition des connaissances spatiales (« route et survey ») seraient plus ressource-dépendants que le premier (« repères »), et impliqueraient même des stratégies de double encodage (ie. verbal) des informations spatiales (Meilinger et al., 2008). La prise de décision a elle aussi fait l'objet de quelques travaux en RV. Il a été montré la prise de décision (eg., parcours libre vs. parcours guidé) améliore les performances aux tâches de type « route » uniquement lorsqu'elle est accompagnée d'une exécution motrice, et dans tous les cas, elle n'affecterait par le niveau « survey » (voir les études préliminaires de Chrastil & Warren, 2011a, b). Ce type de résultat souligne encore les liens étroits entre cognition spatiale et motricité.

Il ressort de l'ensemble de ces études que la navigation et l'apprentissage dans les grands espaces constituent des activités complexes, dépendantes d'un ensemble d'aptitudes et de mécanismes, orchestrant les fonctions visuo-spatiales à petite échelle, les fonctions mnésiques et exécutives, l'attention, la prise de décision, la mémoire de travail ainsi que l'intégration d'informations relatives aux mouvements (Hegarty et al., 2006; Wolbers & Hegarty, 2010 ; Chrastil & Warren, 2012). Sur cette base théorique et empirique sont maintenant décrites les études utilisant la RV dans le domaine de la cognition spatiale du sujet âgé avec ou sans pathologie neurodégénérative (en particulier, nous nous intéresserons à la maladie de Parkinson et à la démence de type Alzheimer).

Vieillesse normale

Cognition spatiale à petite échelle - Un déclin lié à l'âge est observé avec les évaluations classiques, quelle que soit l'aptitude visuo-spatiale considérée: rotation mentale (De Beni, Pazzaglia & Gardini, 2006 ; Dollinger, 1995), prise de perspective mentale (Herman & Coyne, 1980; Inagaki, Meguro, Shimada, Ishizaki, Okuzumi & Yamadori, 2002), et d'autres tests évaluant différents composants visuo-spatiaux (Hegarty & Waller, 2005) comme le *Block design*, *Embedded Figures*, *Hidden Figures*, *Card Rotation* par exemple (pour revue, voir Cronin-Golomb & Amick, 2001 ; Salthouse, 1992). Les applications en RV dans ce domaine sont très peu nombreuses chez la personne âgée. Néanmoins, la validité et l'utilité de la version virtuelle du Rod-and-Frame Test (évaluant la dépendance au champ visuel, ou plus précisément la perception subjective de la verticalité) a été démontrée en termes de meilleur contrôle de l'environnement et des stimuli, de meilleure précision des mesures des comportements et de meilleure validité écologique via l'utilisation de stimuli dynamiques en 3D (Reger et al., 2003). McGee et al. (2000) ont développé un ensemble de tests en RV dont un test de manipulation et de rotation manuelle de figures 3D, utilisant les mêmes figures que le test de rotation mentale de Shepard & Metzler (1971). Ils montrent qu'un entraînement améliore les performances à la tâche de rotation manuelle chez les personnes âgées, montrant la possibilité d'utiliser des applications en RV pour l'entraînement des fonctions visuo-spatiales à petite échelle. Le Money Road Map Test (MRMT, Money, Alexander, & Walker, 1965), qui est un test de rotation mentale, a également été adapté en RV (Morganti, Marrakchi, Urban, Iannocari, & Riva, 2009). Une corrélation entre l'âge des sujets et les performances à ce test a été observée, répliquant celle obtenue avec la version 2D du test (Armstrong & Cloud, 1998). Bien qu'encore peu nombreuses, les répliques RV des tests

visuo-spatiaux à petite échelle chez la personne âgée, reproduisent avec succès les effets de l'âge observés avec les tests de type « papier-crayon » conférant ainsi aux applications RV une bonne validité de construit. A cela, s'ajoutent des applications RV permettant d'explorer des mécanismes sensibles aux vieillissements mais dont l'accès était limité par les méthodes psychométriques conventionnelles. A titre d'exemple, l'application de Messier, Adamovich, Jack, Hening, Sage & Poizner (2007) évalue les capacités d'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice à l'aide d'une tâche nécessitant d'atteindre la position d'une balle dans un espace virtuel, alors qu'une distorsion entre la position de la main et celle obtenue dans l'EV est introduite. Celle-ci forçait les sujets à compenser cette distorsion et à apprendre une nouvelle coordination visuo-motrice pour atteindre la position de cette balle dans l'espace virtuel. Dans une autre phase, une distorsion inverse par rapport à la précédente était imposée, forçant l'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice, inverse de la précédente. Les personnes âgées ont montré des difficultés dans la phase d'apprentissage de la première coordination visuo-motrice par rapport aux jeunes, mais une amélioration des performances avec les essais lors de l'apprentissage inverse, identique aux jeunes. Cette étude révèle l'intérêt de la RV pour l'étude du contrôle visuo-moteur et de l'adaptation aux changements environnementaux, notamment grâce à la manipulation de la position des stimuli dans un espace en 3D.

Ces premiers résultats sont encourageants en termes d'avancées possibles dans la compréhension du déclin et des possibilités d'entraînement des aptitudes spatiales à petite échelle. Néanmoins, les futures études devront également renseigner les différences liées au sexe, qui sont largement documentées dans les études portant sur les évaluations papier-crayon (Linn & Petersen, 1985 ; Parsons et al., 2004 ; Voyer, Voyer & Bryden, 1995), et qui aujourd'hui, ne que modestement explorées dans les études sur le vieillissement.

Cognition spatiale dans des grands espaces. Un effet du vieillissement est largement rapporté (eg., Newman, & Kaszniak, 2000; pour revue, Moffat, 2009) et s'accompagne de plaintes subjectives des personnes âgées relatives à leurs difficultés de navigation et d'orientation spatiale au quotidien (Burns, 1999). Ce déclin des capacités de navigation est aujourd'hui considéré comme étant d'origine multifactorielle (pour revue, Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010), avec notamment des difficultés de construction de représentation spatiales associée au déclin du fonctionnement de l'hippocampe (Rosenzweig, & Barnes, 2003), et/ou des défauts d'intégration des informations liées aux mouvements (Allen, Kirasic, Rashotte, & Haun, 2004) et/ou encore de la planification et de l'ordonnement temporel des différentes séquences composant un trajet (associé au fonctionnement fronto-exécutif, Salthouse, 2003 ; Moffat, 2009 ; West, 1996 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Dans ce contexte multifactoriel, les études en RV ont porté sur quatre domaines: la mémoire spatiale dans des applications réalistes, les stratégies de navigation (en particulier égocentriques vs. allocentriques), l'intégration de trajet et son rôle dans la mémoire spatiale et enfin l'étude des corrélats neuro-fonctionnels du vieillissement de la cognition spatiale dans les grands espaces.

- *Mémoire spatiale dans des applications réalistes.* Concernant le développement des connaissances spatiales dans des grands espaces, et en référence au modèle L-R-S, un déclin pour des tâches de rappel libre ou de reconnaissances de repères (connaissances de type « Landmark ») après navigation dans un EV a été observé (Cushman, Stein, & Duffy, 2008 ; Head & Isom, 2010 ; Jansen, Schmelter, & Heil, 2010 ; Liu, Levy, Barton & Iaria, 2011), confirmant les données obtenues dans des évaluations en conditions réelles (Bruce & Herman, 1983 ; Kirasic, 1991 ; Lipman, 1991 ; Monacelli, Cushman, Kavcic, & Duffy, 2003). Un déclin des performances pour des tâches évaluant les connaissances de type « route » a été rapporté, dans des tests en laboratoire à l'aide de séries de photos (Lipman, 1991; Lipman & Caplan, 1992) ou lors de navigation dans des situations réelles (Barrash, 1994 ; Monacelli et al., 2003 ; Wilkniss et al., 1997 ; Taillade et al., 2012). Ce déclin a été reproduit dans des EV

réalistes (hôpital virtuel : Cushman et al., 2008 ; maisons virtuelles : Meulenbroek, Petersson, Voermans, Weber, & Fernández, 2004 ; villes virtuelles : Head et Isom, 2010 ; Iaria, Palermo, Committeri, & Barton, 2009 ; Liu et al., 2011 ; Plancher, Nicolas, & Piolino, 2008 ; Plancher, Gyselinck, Nicolas, & Piolino, 2010; Zakzanis, Quintin, Graham, & Mraz, 2009). De la même manière, l'acquisition de représentations spatiales de type « survey » ont aussi fait l'objet d'études en RV (environnements virtuels de type labyrinthe composés de couloirs: Jansen et al., 2010; Head et Isom, 2010 ; Moffat et al., rapportent un déclin des performances lié au vieillissement, comme cela avait été observé en 2006; « building » virtuels; Foreman, Stanton-Fraser, Wilson, Duffy & Parnell, 2005; Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger & Lindenberger, 2005; Sjölander, Höök, Nilsson & Andersson, 2005; quartiers virtuels : Iaria et al., 2009; Liu et al., 2011), qui toutes conditions réelles (Kirasic, 1991, 2000; Simon, Walsh, Regnier, & Krauss, 1992). A ce niveau d'analyse, les études en conditions réelles et en RV indiquent que le vieillissement cognitif affecte surtout les deux derniers niveaux d'acquisition de représentations spatiales définies par le modèle de Siegel & White (1975) (Repère, Route, Configuration/Survey). On peut noter quelques études utilisant des tâches de navigation dans des EV à l'aide d'une carte apprise ou disponible pendant la navigation, inspirées par le Money-Road-Map test (Money, 1965) ou le sous test « Wisc-R Maze » (Wechsler, 1976), développés pour mesurer la désorientation topographique (Morganti, Marrakchi, Urban, Iannocari & Riva, 2009 ; Carelli, Rusconi, Scarabelli, Stampatori, Mattioli & Riva, 2011). Ces tâches semblent toutefois peu spécifiques et pourraient impliquer à la fois la mémoire de route, les capacités de prise de perspective mentale ou de rotation mentale. N'ayant pas été comparées directement avec des tâches de navigation ou d'apprentissage en condition réelle, ces études ne permettent pas pour le moment de conclure sur la validité de ces outils dans l'évaluation de la désorientation topographique. Les seules études comparant directement les performances d'apprentissage et de navigation entre des environnements réels et leurs équivalents virtuels ont permis de montrer des performances équivalentes entre ces deux situations d'apprentissage, quel que soit le niveau de représentation testé (Cushman et al., 2008).

L'ensemble de ces résultats confirme les résultats obtenus en conditions réelles, montrant des difficultés d'apprentissage touchant les deux niveaux de représentations de l'espace (Route et Survey), quelle que soit la taille des environnements. Ils favorisent ainsi l'utilisation d'applications réalistes en RV pour l'évaluation écologique des difficultés de navigation chez ces personnes. Ces résultats restent toutefois à confirmer, les études comparant directement les apprentissages dans des EV et des équivalents réels restant peu nombreuses chez la personne âgée.

- *Stratégies de navigation.* Deux approches se distinguent dans ce domaine : une première utilisant des répliques virtuelles de labyrinthes (issues des travaux chez l'animal) et une seconde utilisant des applications plus réalistes.

Des versions virtuelles de la piscine de Morris¹⁷ (Antonova, Parslow, Brammer, Dawson, Jackson & Morris, 2009 ; Driscoll et al., 2003; Driscoll, Hamilton, Yeo, Brooks & Sutherland, 2005; Laurance, Thomas, Newman, Kaszniak, Nadel & Jacobs, 2002; Moffat et al., 2007; Moffat & Resnick, 2002; Schoenfeld, Lehmann & Leplow, 2010; Thomas, Laurance, Luczak & Jacobs, 1999), adaptée à l'humain, ont permis de reproduire le déclin observé dans sa version réelle (Newman & Kaszniak, 2000), suggérant des difficultés chez les personnes âgées pour développer et utiliser des représentations spatiales allocentriques. Deux

¹⁷La piscine de Morris est un labyrinthe classiquement utilisé chez le rat pour l'étude la mémoire spatiale. Elle consiste en une piscine circulaire remplie d'un liquide opaque dans laquelle l'animal doit trouver une plateforme cachée sous le liquide, en utilisant des indices externes présents dans l'arène, permet d'évaluer les stratégies de navigation dites « égocentrique » ou procédurale et « allocentriques » (Morris, Garrud, Rawlins, & O'Keefe, 1982).

applications récentes, utilisant des répliques virtuelles de labyrinthes, ont étudié l'effet de l'âge sur les stratégies de navigation (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto & Bohbot, 2011 ; Rodgers, Sindone & Moffat, 2012). La première a utilisé une version virtuelle d'un labyrinthe radiaire à 12 bras, avec une première phase d'apprentissage d'associations de paires de stimuli (vues simultanée de deux bras) et de réponses (de type « procédurale », nécessitant de récupérer un objet dans un des bras). La seconde phase nécessitait une utilisation flexible de ces associations, dans laquelle les paires de stimuli étaient réarrangées (évaluant la mémoire « associative » que les auteurs ont associée à l'utilisation d'une « carte cognitive »). Leurs résultats concluent à une utilisation préférentielle d'une stratégie de navigation « égocentrique » (ou « procédurale ») associée à un déficit des apprentissages associatifs (ou mettant en jeu l'utilisation d'une « carte cognitive ») chez les personnes âgées. La deuxième étude, à l'aide d'un labyrinthe en Y, montre elle aussi une préférence des personnes âgées pour les stratégies de navigation dites « égocentriques » (ou procédurale), comparé aux jeunes utilisant à la fois les stratégies « égocentriques » et « allocentriques ». Cette préférence des âgés pour les stratégies de navigation de type « procédurale » peut toutefois paraître contradictoire à la lumière d'autres travaux montrant des difficultés pour la mémoire de route, et notamment sur la base de labyrinthes virtuels de plus grande taille (Head et Isom, 2010; Jansen et al., 2010 ; Kalia, Legge & Giudice, 2008 ; Moffat et al., 2001 ; Sayers, 2004).

La navigation dans des grands espaces au quotidien est une activité complexe, nécessitant de planifier des trajets, de contrôler sa navigation et de mettre à jour sa position durant la navigation (Allen, 1999 ; Wiener et al., 2009 ; Wolbers et Hegarty, 2010). Certains auteurs ont donc suggéré un rôle du déclin exécutif (Braver & West, 2008 ; Salthouse, Atkinson & Berish, 2003 ; West, 1996) dans les difficultés de navigation chez les personnes âgées, en plus des déclin mnésique, visuo-spatiaux ou d'intégration des informations relatives aux mouvements (Kirasic, 2000 ; Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Peu d'études ont exploré directement cette hypothèse pour le moment. Néanmoins, deux études en RV suggèrent un rôle du déclin exécutif en démontrant qu'à connaissances spatiales égalisées, les différences jeunes-âgés s'expriment toujours lorsqu'il s'agit de les utiliser pour planifier et exécuter un trajet. En effet, dans l'étude réalisée par Iaria et al. (2009), les participants exploraient librement un quartier virtuel en plusieurs séances, avec pour instruction de mémoriser six points de repère. Une fois que les tests évaluant leurs connaissances du quartier (tâche de placement des repères sur une carte) atteignaient le score maximum, les participants réalisaient la tâche de type « Wayfinding », où ils devaient atteindre les différentes positions apprises. Leurs résultats ont montré à la fois une diminution de la vitesse d'apprentissage de la topographie de l'environnement et de l'efficacité pour atteindre ces points de repère, suggérant des difficultés à la fois pour l'acquisition de connaissances spatiales (associé au fonctionnement mnésique) et leur utilisation pour naviguer dans un environnement (voir aussi Liu et al., 2011 ; pour une étude similaire de la même équipe). Foreman et al. (2005) ont étudié les capacités de personnes âgées à naviguer dans un centre commercial virtuel, dans une tâche de transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel (après quatre séances d'apprentissage de la topographie du centre commercial virtuel). Et, malgré des connaissances spatiales équivalentes aux jeunes, les personnes âgées avaient des difficultés pour naviguer dans l'environnement réel, suggérant ainsi des difficultés d'utilisation des connaissances pour planifier et exécuter le trajet. On peut également rapprocher les résultats d'Etchamendy et al. (2011) vus précédemment et qui montraient les âgés ayant les meilleures performances dans la partie « flexible » de leur labyrinthe radiaire à 12 bras étaient également ceux ayant de meilleures performances sur une autre tâche de navigation réalisée dans une ville virtuelle. Enfin, dans notre étude (Taillade et al., 2012), nous avons retrouvé une absence d'effet du vieillissement sur les connaissances spatiales acquise en RV contrastant avec un déclin des

performance sur une la tâche de transfert des connaissances spatiales du virtuel au réel. Ce déclin était corrélé aux déclinés mnésiques et exécutifs mesurés à l'aide d'une batterie de tests neuropsychologiques. Aussi, si les auto-estimations des difficultés spatiales en vie quotidienne¹⁸ chez les sujets jeunes étaient corrélées à leur performance de transfert de connaissances, ce n'était pas le cas pour les âgés qui surestimaient leur performances spatiales quotidiennes. Nos résultats étaient donc en faveur d'une origine à la fois mnésique et exécutive des difficultés de navigation liées à l'âge. A cela, l'appréciation de ces difficultés était sous-estimée par les participants âgés suggérant des difficultés métacognitives supplémentaires.

Ces premières études révèlent bien l'intérêt de disposer d'outils tels que ceux proposés par la RV, pour appréhender la complexité des effets du vieillissement sur les mécanismes en œuvre dans la navigation spatiale.

- *Cognition spatiale et corrélats neuro-anatomiques.* Quelques études associant la RV à des techniques de neuro-imagerie fonctionnelle ont tenté d'éclaircir le rôle des déclinés mnésiques (mémoire spatiale de type carte cognitive vs. procédurale) et des perturbations exécutives par l'étude des substrats anatomiques impliqués. Antonova et al. (2009) ont étudié la relation entre l'activation cérébrale (IRMf), des mesures du volume de régions cérébrales et des performances de navigation dans une version virtuelle de la Piscine de Morris. Une perte de volume dans le cortex préfrontal et le gyrus parahippocampique était rapportée chez leurs sujets âgés, mais pas dans l'hippocampe. Une activation d'un large réseau de structures a été notée avec des différences « jeunes - âgés » lors de l'encodage et la récupération dans la Piscine de Morris. Seuls les jeunes présentaient une activation de l'hippocampe (droit et gauche), du gyrus parahippocampique, du pôle frontal et du cortex préfrontal dorso-latéral droits durant l'encodage et du cortex préfrontal dorso-latéral droit durant la récupération. Les auteurs ont conclu à un déclin de la mémorisation des informations spatiales allocentriques, associée principalement à une diminution de l'activité de l'hippocampe lié au vieillissement, ainsi qu'à un dysfonctionnement préfrontal et parahippocampique. Moffat et al. (2006) ont utilisé un EV composé de plusieurs pièces, interconnectées par des couloirs et mesuré l'activation du cerveau pendant l'encodage de la configuration de l'EV. Chez les sujets jeunes, s'observaient des activations dans un large réseau de structures (hippocampe, gyrus parahippocampique, le cortex rétrosplénial, cortex pariétal bilatéral, lobe pariétal médial et le cervelet). Chez les âgés, l'activation était réduite dans l'hippocampe et le gyrus parahippocampique, le lobe pariétal et le cortex rétrosplénial médian. L'examen des relations entre les performances de navigation spatiale et les activations cérébrales a également montré des différences entre les jeunes et les âgés. L'activation du gyrus parahippocampique était liée aux performances dans les deux groupes, mais l'activation du gyrus frontal supérieur n'a été notée que pour le groupe des jeunes et l'activation du cuneus, gyrus occipital, inférieur, gyrus fusiforme et inférieur gyrus temporal seulement dans le groupe des plus âgés. Aussi, Meulenbroek et al. (2004) ont également analysé l'activation de structures cérébrales pendant l'encodage d'une route dans un EV et la réalisation d'une tâche nécessitant d'indiquer la direction prise à différents points de décision (connaissances de type « route »). Une faible différence entre les performances des adultes jeunes et âgés est obtenue pour la tâche de reconnaissance. Le déclin des performances dans le groupe des âgés était associé à une activation réduite du gyrus parahippocampique et à une réduction de la suppression de l'activité dans le cortex cingulaire antérieur pendant l'encodage. Une faible différence entre les activations cérébrales des sujets jeunes et âgés était également trouvée pendant la reconnaissance de route. De même, Etchamendy, et al. (2011) montraient également une

¹⁸ [Évalué avec l'échelle de Skelton et al., 2000).

relation positive entre les performances au test de mémoire « flexible » du labyrinthe radiaire et l'activation du cortex préfrontal dorso-latéral et de l'hippocampe contrastant avec une relation négative avec l'activation du noyau caudé. A cela, la préférence des personnes âgées pour la stratégie « procédurale » était s'associée à des activations du noyau caudé et non à des activations de l'hippocampe pour réaliser la tâche « wayfinding » (voir aussi Rodgers et al., 2010 ; pour une évaluation des stratégies de navigation dans un labyrinthe en Y).

Ainsi, les bases neurales du déclin des performances de navigation avec l'âge semblent principalement impliquer les cortex préfrontaux mais aussi les structures hippocampiques. Cette conclusion est confortée par les études utilisant des mesures neuro-volumétriques. Le déclin des connaissances de type « route » et « survey » s'associerait à la perte du volume d'un réseau de structures assez large (hippocampe, gyrus parahippocampique, noyau caudé) (Antonova et al., 2009 ; Head et Isom, 2010, Moffat et al., 2007). Head & Isom (2010) ont utilisé un labyrinthe virtuel pour comparer l'effet de l'âge sur des tâches de rappel de route (rappel d'une route apprise en trois fois) et de type « wayfinding » (atteindre une position particulière après une exploration libre de l'environnement). Des tâches supplémentaires leur ont été administrées: rappel libre de repères, positionnement et identification de repères, reconnaissance de scènes. Ils ont observé des différences liées à l'âge pour les tests évaluant l'apprentissage de la configuration de l'environnement et pour les tâches de type « wayfinding » et rappel de « route ». Les performances aux tests de rappel de route étaient associées au volume du noyau caudé et celles pour les tâches de type « wayfinding » au volume de l'hippocampe, en accord avec les études chez les sujets jeunes (Hartley et al., 2003 ; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003). Contrairement à leurs attentes, ils n'ont pas trouvé de relation entre le volume du cortex préfrontal et les performances de navigation, que ce soit pour les tâches associées au rappel de route ou à la tâche de type « wayfinding ». Par contre, Moffat et al. (2007) rapportent, chez les âgés, des performances dans la piscine de Morris virtuelle corrélées, d'une part, à la perte volumétrique du cortex préfrontal et d'autre part, à l'augmentation des persévérations obtenues au Winconsin Card Sorting (Healton, Chelune, Talley, Kay & Curtiss, 1993), suggérant également un rôle du déclin exécutif dans les difficultés de navigation, même dans des environnements relativement simples.

Intégration de trajet et activités sensorimotrices. Dans un test en laboratoire, Allen et al. (2004) rapportent un déficit pour l'intégration de trajet basée uniquement sur les informations translationnelles et rotationnelles d'origine vestibulaires (condition de déplacement en chaise roulante et les yeux fermés) mais pas pour la condition fournissant des informations vestibulaires et proprioceptives (en condition de marche avec les yeux fermés). Ainsi, les âgés présentent des difficultés à intégrer les mouvements translationnels et rotationnels, lorsqu'un seul type d'information est disponible (eg., vestibulaire) mais ont des performances préservées lorsque plusieurs source sont fournies (eg., vestibulaires et proprioceptives). Ces résultats suggèrent que leur déficit sensoriel (Dennis & Cabeza, 2008) peut être compensé lorsque différentes sources sensorielles sont sollicitées. Aucune étude en RV à ce jour n'a été réalisée sur le rôle respectif des informations proprioceptives et vestibulaires dans l'intégration de trajet chez la personne âgée. Par contre, trois études se sont intéressées aux effets du vieillissement sur l'intégration de trajet basée sur le flux optique. Schoenfeld et al. (2010) ont montré un effet négatif de l'âge sur l'intégration de trajet basée sur le flux optique, dans une tâche nécessitant de donner la direction de son point de départ après avoir effectué un trajet de deux ou trois changements de direction dans une forêt virtuelle. Pour aller plus loin, Mahmood, Adamo, Briceno & Moffat (2009) ont analysé l'effet du vieillissement sur les deux composantes (rotation et mouvements linéaires) du flux optique et leur rôle respectif dans le déclin des performances d'intégration de trajet. Précisément, l'étude de la reproduction des mouvements linéaires a été réalisée dans un couloir virtuel sans indices visuels, avec une texture sur le sol et les parois. Les tâches de reproduction de la rotation seule

et d'intégration de trajet (nécessitant d'intégrer les deux composantes), ont été réalisées dans une arène circulaire virtuelle, ne présentant également que des textures et pas d'indices visuels. Quand chacune des deux composantes était évaluée séparément, les personnes âgées présentaient des performances équivalentes à celles des jeunes. Par contre, lorsque les deux composantes devaient être intégrées, les personnes âgées avaient de moins bonnes performances. Ce résultat suggère un déficit d'intégration des composantes translationnelles et rotationnelles. Harris & Wolbers (2012) ont complété ce résultat en montrant que le déficit d'intégration avec l'âge augmentait avec l'augmentation des distances et des angles de rotation dans la tâche de complétion de triangle, suggérant aussi des difficultés avec l'âge situées dans le traitement de chaque information (translationnelle ou rotationnelle) en amont de leur intégration.

Ces résultats en RV complètent les travaux d'Allen et al. (2004) en montrant qu'au sein d'une source sensorielle l'âge affecte l'intégration des informations translationnelles et rotationnelles, ce qui pourrait augmenter le pouvoir compensatoire d'une stimulation multi-sensorielle. Une telle hypothèse requière plus d'investigations et en particulier à l'aide des applications virtuelles avec lesquelles il est possible à la fois de manipuler les mouvements rotationnels et translationnels ainsi que les sources sensorielles (flux optique, vestibulaires, et proprioceptives). De telles investigations seront riches d'apports pour la compréhension des effets de l'âge sur les mécanismes d'intégration de trajet en termes à la fois de déclin d'intégration ou de compensation multi-sensorielle.

A un autre niveau, Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter, Krüger & Lindenberger (2005) ont examiné l'impact du contrôle de l'équilibre sur les performances de navigation de la personne âgée. Les participants devaient apprendre la configuration et la position d'objets dans un musée virtuel, en marchant sur un tapis roulant. Une condition permettait aux participants de contrôler leur équilibre grâce à une barre et une autre nécessitait de contrôler leur équilibre sans cette aide. L'absence d'aide au maintien de l'équilibre durant la navigation dans l'EV a diminué les performances de mémoire spatiale et provoqué une augmentation des mouvements du tronc des personnes âgées. Cela suggère que le contrôle de l'équilibre, et au sens large le contrôle sensori-moteur durant la marche, requière des ressources en mémoire de travail ou un contrôle exécutif qui en retour affecte les performances des activités cognitives concourantes, dont le fonctionnement de la mémoire spatiale (voir aussi, Beauchet & Berrut, 2006 ; Doumas, Smoldes & Krampe, 2008 ; Li, Krampe & Bondar, 2005; Lindenberger, Marsike & Baltes, 2000 ; Neider, Gaspar, McCarley, Crowell, Kaczmariski & Kramer, 2011 ; Schellenbach, Lövdén, Verrel, Crowell, Kaczmariski & Kramer, 2010). Cette interprétation trouve également écho dans les résultats de l'étude de Plancher et al. (2012) qui, à l'aide d'une tâche virtuelle de navigation automobile en milieu urbain, rapportent que le déclin des performances de mémoire spatiale chez le sujet âgé est plus prononcé lorsqu'il est en position de conducteur (condition active) que de passager (condition passive) (à l'inverse du sujet jeune).

Conclusion et Perspectives. A ce stade des investigations en RV, l'origine hippocampo-frontale du vieillissement de la cognition spatiale demeure pertinente, avec un déclin touchant principalement les capacités d'apprentissage et de mémoire spatiale, les mécanismes d'intégration des informations relatives aux mouvements du corps, les mécanismes de planification de trajet et de contrôle moteur de la navigation (Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010). Ces difficultés d'acquisition et d'utilisation des connaissances spatiales s'accompagneraient, chez les personnes âgées, d'une préférence pour les stratégies de navigation plus procédurales (dépendantes du noyau caudé). D'autres études doivent étayer cette conclusion et apporter plus de précisions afin de permettre une meilleure compréhension des effets du vieillissement sur les apprentissages et la navigation spatiale. Par exemple, les études utilisant le couplage RV-imagerie fonctionnelle encore peu nombreuses n'ont pas

comparé les activations (hippocampe, cortex pariétal, retrosplénial, préfrontal, gyrus parahippocampique, noyau caudé et cortex préfrontal), durant l'encodage, la récupération, la planification ou l'exécution du trajet, comparaisons qui sans doute éclaireront le rôle des structures impliquées dans les effets du vieillissement normal sur les différents processus impliqués dans la mémoire spatiale et la navigation. Aussi, le rôle des différentes composantes sensorimotrices (copies efférentes motrices, informations proprioceptives) sur le développement des connaissances spatiales (de type Repères, Route et Survey) doit être précisé chez les âgés. De même, l'interaction entre contrôle sensorimoteur et cognitif est pour le moment peu connue et pourrait s'inspirer des travaux sur la marche montrant que celle-ci place les personnes âgées en situation de tâches multiple (Baldwin, 2002) dans laquelle le contrôle sensori-moteur devient prioritaire sur la navigation (voir Lindenberger, Marsiske, & Baltes., 2000 ; pour une double-tâche de marche et de conversation). La RV par ses multiples interfaces sensori-motrices, offre un cadre d'étude privilégié pour appréhender les effets du vieillissement sur les relations entre sensori-motricité, mémoire spatiale et navigation (Chrastil & Warren, 2012).

D'autres attentes peuvent être formulées, notamment en termes de relation entre les performances en RV, et celles obtenues par des questionnaires d'auto-évaluations de sa performance. Des études dans ce domaine enrichiraient la compréhension des liens entre déclin des capacités navigationnelles et difficultés méta-cognitives des âgés à les auto-estimer (Taillade et al., 2012). Aussi, un incontournable sera dans les prochaines études la prise en compte de l'effet du sexe, dont l'influence sur les performances ou les stratégies d'apprentissage et de navigation en réel et en virtuel n'est plus à démontrer (eg., Montello, Lovelace, Golledge & Self, 1999 ; Castelli, Corazzini, Geminiani, 2008 ; Woolley et al., 2010) et, qui pourrait être modifié (atténué) par l'âge (Liu et al., 2011). Les perspectives d'investigations sont extrêmement nombreuses, les recherches ayant été retardées par la nécessité préalable d'adapter les dispositifs technologiques aux contraintes des utilisateurs âgés.

Vieillesse pathologique

Les neuropathologies associées au vieillissement, et notamment la Démence de type Alzheimer (DTA) et la Maladie de Parkinson (MP), sont des enjeux de santé publique incontestables : l'incidence d'une DTA est de 3% chez les 65 ans et passe à 50% chez les plus de 85 ans (Résultats PAQUID, Barberger-Gateau, Letenneur & Pérès, 2004). La MP de son côté, toucherait en Europe, 1.5 % des personnes entre 70 et 74 et 5.1 % des 85 à 89 ans (De Rijk et al., 1997). La MP augmenterait également fortement le risque d'une évolution vers la démence (Aarsland, Zaccai & Brayne, 2003). Dépister précocement ces neuropathologies requière une description précise et différentielle des déficiences neuro-fonctionnelles associées à chaque processus neuro-pathologique et, notamment celle renseignant les altérations spécifiques des capacités visuo-spatiales. Dans ce contexte, les études utilisant des applications en RV ont adressé les troubles de la cognition spatiale à grande échelle (désorientation topographique) dans le cas de la DTA et les troubles de la cognition spatiale à petite échelle dans la MP, afin de singulariser et circonscrire le tableau clinique de ces deux neuropathologies (Previc, 1998 ; Cronin-Golomb & Amick, 2001).

- **Maladie de Parkinson et Cognition spatiale** - Caractérisée par les difficultés motrices, la maladie de Parkinson est également associée à des déficits touchant : les fonctions visuelles (Davidson, Cronin-Golomb & Lee, 2005 ; Uc et al., 2005), les fonctions visuo-spatiales à petite échelle (Amick, Schendan, Ganis & Cronin-Golomb, 2006 ; Cronin-Golomb & Amick, 2001; Cronin-Golomb & Braun, 1997; Davidson, Wagenaar, Young & Cronin-Golomb, 2008 ; Lee, Harris & Calvert, 1998), les mécanismes d'intégration d'informations

sensorimotrices pour le contrôle de la marche, de la posture ou des mouvements de la main (Adamovich, Berkinblit, Hening, Sage & Poizner, 2001 ; Davidsdottir, Cronin-Golomb & Lee, 2005). Ces déficits sont en relation avec l'altération du fonctionnement des ganglions de la base et du lobe pariétal (Davidsdottir et al., 2008 ; -Golomb & Amick, 2001).

Concernant les capacités visuo-spatiales à petite échelle, seules trois études ont été menées avec des applications en RV. Stirk & Foreman (2005) ont observé sur deux tâches, l'une nécessitant la manipulation d'objets virtuels (Virtual Tray of Objects Task) et l'autre un changement de perspective (Virtual Flag Location Task), que les patients parkinsoniens présentaient des performances déficitaires uniquement sur la première tâche suggérant des difficultés particulières de rotation mentale.

Dans l'étude de Davidsdottir et al. (2008), une tâche de navigation dans un couloir a été utilisée pour évaluer les mécanismes du traitement du flux optique selon la dominance droite ou gauche de symptômes moteurs des patients (31 patients vs. 18 contrôles). La déviation de la trajectoire de la marche dans le couloir était mesurée dans trois conditions: une condition virtuelle (flux optique seul), une condition réelle yeux ouverts (flux optique et stimulation sensorimotrice) et une condition réelle yeux fermés (stimulation sensorimotrice sans retour visuel). Les déviations de la marches étaient ensuite mis en relations avec des mesures des fonctions visuelles (acuité, sensibilité aux contrastes, perception des mouvements dans un plan) et des fonctions visuo-spatiales (perception de la verticalité, bissection de ligne, perception du flux optique, estimation du point de référence égocentrique) pour en comprendre l'origine. En condition réelle yeux fermés, tous les patients parkinsoniens présentent une déviation à gauche, qui est d'ailleurs plus marquée chez les femmes. En condition réelle yeux ouverts, seuls les parkinsoniens à dominance gauche présentent des déviations de marches (plutôt orientées à droite). Enfin, en virtuel, les parkinsoniens à dominance gauche présentent toujours des déviations de marche à droite et cette fois-ci, des déviations à gauche sont observées pour les parkinsoniens à dominance droite. Dans tous les cas, les déviations observées n'étaient pas corrélés aux mesures visuelles mais l'étaient avec les mesures spatiales : celles des Parkinsoniens à dominance gauche étaient corrélées à la mesure d'estimation de référence égocentrique et celles des Parkinsoniens à dominance droite étaient corrélées à leur score de perception de la verticalité. Pour les auteurs, leur étude étaye l'hypothèse d'une altération de la perception visuo-spatiale sous-tendue par les lobes pariétaux dans la maladie de Parkinson ; et surtout démontre que l'utilisation de la condition virtuelle est un moyen efficace pour confirmer l'origine visuo-spatiale des déviations de la marche quelle que soit la dominance gauche ou droite des symptômes moteurs.

Enfin, dans le travail de Messier et al. (2007) présentée précédemment pour ses résultats sur le vieillissement normal, l'application RV d'apprentissage de coordination visuo-motrice était également proposée à des patients parkinsoniens. Pour rappel, cette tâche implique l'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice dans un premier temps, puis oblige le participant dans un second temps à apprendre une coordination inverse. Les patients parkinsoniens ont obtenu des résultats identiques aux âgés pour la première phase d'apprentissage, mais ont été incapables de faire l'apprentissage inverse (Messier et al., 2007). Pour les auteurs, ces résultats confirment le déclin des capacités d'apprentissage de coordination visuo-motrice dans la MP ainsi que le rôle des ganglions de la base dans ces apprentissages.

Concernant la cognition spatiale dans des grands espaces, les études portant sur les difficultés de mémoire spatiale ou de navigation chez des patients parkinsoniens sont très rares, que ce soit en situation réelle ou de laboratoire, et sont tout à fait absente en RV. Dans l'étude d'Uc et al. (2007), les performances de navigation en condition réaliste (apprentissage de route en situation de conduite automobile dans un véhicule réel mais permettant de mesurer les performances et les comportements des participants) sont rapportées comme

altérées chez les patients MP. La diminution des performances de navigation (rappel de la route) observée dans cette étude a été associée, par les auteurs, à la forte demande cognitive de la situation de conduite (situation de tâche multiple, nécessitant un contrôle cognitif et sensorimoteur de la navigation) et était plus corrélée au déclin visuel et cognitif qu'au déclin des fonctions motrices de ces patients. Une évaluation des capacités de mémoire spatiale a été réalisée grâce à un labyrinthe (en réel) reprenant les caractéristiques de la piscine de Morris et d'un labyrinthe radiaire (Leplow, Höll, Zeng, Herzog, Behrens & Mehdorn, 2002). Le but était de retrouver cinq positions parmi un ensemble de vingt dans une arène circulaire présentant des indices proximaux et distaux. Deux variables étaient à l'étude. D'abord, pour évaluer la stratégie de navigation (égocentrique vs. allocentrique), le point de départ pour rechercher les cibles était manipulé de sorte à ce qu'il soit identique à celui de la phase d'apprentissage (condition favorable aux stratégies égocentriques) ou qu'il soit changé de 90° (condition favorables aux stratégies allocentriques). Puis, la deuxième variable concernait la présence ou non d'indices proximaux, en vue d'évaluer leur utilisation pour la recherche de cibles par les participants. Les résultats ont montré que les patients parkinsoniens étaient surtout en difficultés lorsque la tâche sollicitée une stratégie allocentrique (changement de point de départ) d'autant plus pertinente en condition d'absence d'indices proximaux. Pour les auteurs, leurs résultats témoignent plus d'une incapacité chez les patients parkinsoniens à initier les stratégies navigationnelles pertinentes selon les indices environnementaux en présence. En effet, la tâche proposée dans cette étude est à la fois dépendante de la mémoire spatiale, de la flexibilité cognitive et de la planification.

Montgomery, Silverstein, Wichmann, Fleischaker et Andberg, (1993) ont étudié les capacités d'intégration de trajet (nommée par les auteurs « Spatial updating ») grâce à l'aide de tâches analogues à la tâche de complétion de triangle. Six parcours construits sur une grille de 6 m sur 6 m étaient proposés, avec 1 ou 2 changements de directions et différents angles de rotation aux intersections. Le but était d'estimer la direction du point de départ du trajet à la fin du parcours. Dans une première condition, les participants étaient déplacés sur une chaise roulante pour permettre une stimulation vestibulaire (et également proprioceptive selon les auteurs). A cela, une boîte occultante était placée sur leur tête de sorte à masquer les informations au sol tout en fournissant des informations visuelles (flux optique) sur l'environnement. Dans une seconde condition, les sujets étaient déplacés sur une chaise roulante avec cette fois-ci les yeux bandés, (condition considérée par les auteurs comme vestibulaires et proprioceptives). Les patients parkinsoniens ont obtenu des performances déficitaires pour la condition fournissant des informations visuelles mais pas pour celle reposant uniquement sur des informations vestibulaires et proprioceptives. Cette altération était corrélée à des mesures d'aptitudes spatiales suggérant pour les auteurs une origine visuo-spatiale dans les troubles de l'orientation spatiale de ces patients. Ce type de résultats témoigne dans le cas de la MP de la nécessité de mieux comprendre les liens entre les mécanismes de cognition spatiale à petite échelle et grande échelle.

Au total, les investigations en RV restent encore peu nombreuses mais confirment l'altération générale des aptitudes visuo-spatiales à petite échelle associées au fonctionnement du cortex pariétal et des ganglions de la base dans la MP : intégration sensori-motrice pour le contrôle des mouvements, apprentissages de coordinations visuo-motrices et traitement du flux optique (affectant le contrôle de trajectoire de la marche, notamment). Comme pour le vieillissement normal, de nombreuses recherches restent à réaliser dans différents domaines : apprentissage visuo-moteur, relation entre rotation manuelle et rotation mentale, interaction entre différentes sources d'informations sensorimotrices sur le contrôle de la trajectoire de la marche, autant de points qu'il serait pertinent d'approfondir pour étayer la compréhension des troubles visuo-spatiaux à petite échelle caractérisant la MP. Aussi, l'étude de la mémoire des trajets et des performances de navigation dans la MP pourrait être initiée afin de préciser

l'impact de la MP sur la relation entre contrôle cognitif et contrôle moteur durant la navigation.

-Démence de type Alzheimer et cognition spatiale- Bien que les troubles de la mémoire épisodique dominent le tableau clinique (Morris & Kopelman, 1982), un déclin affectant les capacités visuo-spatiales à petite échelle a été noté chez des patients atteints de DTA: déficit de l'exploration spatiale (difficultés pour localiser et atteindre des objets, hémignégligence, etc.) (Previc, 1998), praxies visuo-constructives (copie, dessin et construction de figures en 3D) (Moore & Wyke, 1984 ; Kálmán, Maglóczy & Janka, 1995; Brodaty & Moore, 1997), problème de détection de rotation de figures (Kaskie & Storandt, 1995), ou de prise de perspective mentale évaluée à l'aide du MRMT (Armstrong & Cloud, 1998; Rainville, Marchand & Passini, 2002 ; pour revue, voir également Cronin-Golomb & Amick, 2001). A notre connaissance, aucune étude n'a utilisé la RV pour l'évaluation de ces aptitudes ou l'étude de l'interaction entre fonctions visuo-motrices et visuo-spatiales dans la DTA.

Concernant la cognition spatiale à grande échelle, la présence d'une désorientation topographique (troubles de la navigation et de l'apprentissage dans les grands espaces) dans la DTA, pouvant apparaître précocement, est bien documentée (Algase, Beattie, Song, Milke, Duffield & Cowan, 2004 ; Ballard, Mohan, Handy & Patel, 1991 ; Cherrier, Mendez & Perryman, 2001 ; Henderson, Mack & Williams, 1989 ; Monacelli et al., 2003 ; Pai & Jacobs, 2004 ; Passini et al., 1995). Celle-ci est un facteur majeur de la perte d'autonomie chez ces personnes (Rainville, Passini & Marchand, 2001), de risque d'accidents et, est souvent à l'origine du placement en institution (McShane et al., 1998). De plus, une caractéristique importante de la DTA est la détérioration de la mémoire épisodique (Morris & Kopelman, 1986 ; Hodges, 2006), et en particulier de sa composante spatiale. Cette détérioration est largement renseignée par les études utilisant des évaluations en laboratoire de la mémoire spatiale (tâche analogue à la piscine de Morris : Kalová, Vlček, Jarolímová & Bureš, 2005; mémoire d'objets à l'aide de photos d'un appartement : Kessels, Feijen & Postma, 2005) ou en encore en situations réelles (mémoire de route : Cherrier et al., 2001 ; Monacelli et al., 2003 ; Uc, Rizzo, Anderson, Shi & Dawson, 2004 ;pour revue, voir Iachini, Iavarone, Senese, Ruotolo, Ruggiero, 2009 ; Vlcek, 2011). Cette altération de la mémoire spatiale est considérée comme liée à une perte neuronale du lobe temporal médian (Blennow, de Leon & Zetterberg, 2006 ; DePolyi, Rankin, Mucke, Miller & Gorno-Tempini, 2009) et comme origine principale de la désorientation observée dans la DTA (pour revue, voir Iachini et al., 2009 ; Vlcek, 2011). Néanmoins, le déclin mnésique pourrait ne pas être la seule cause de cette désorientation topographique et d'autres aptitudes pourraient y participer. En effet, ont été identifiés des troubles des mécanismes d'intégration de trajet basé sur le flux optique (Kavcic & Duffy, 2003; Duffy, Cushman & Kavcic, 2004 ; Kavcic, Fernandez, Logan & Duffy, 2006 ; Mapstone, Dickerson & Duffy, 2008), les déficits attentionnels (Chiu et al., 2004 ; Kavcic & Duffy, 2003), mais aussi les perturbations exécutives couramment rapportés dans la DTA, comme les capacités de planification de trajet (Chiu et al., 2004 ; Mack & Patterson, 1995 ; Passini et al., 1995 ; Rainville et al., 2001).

A partir de ces résultats, les travaux utilisant la RV ont pris deux orientations principales : 1) l'une visant à contribuer à la compréhension des mécanismes de la désorientation topographique dans la DTA ; et 2) l'autre animée par l'examen du potentiel clinique de la RV pour le diagnostic précoce et dépistage de la DTA.

- Etude des mécanismes de la désorientation topographique dans la DTA- Quelques études ont tenté d'éclairer ces conclusions via des investigations avec des dispositifs RV. Jheng & Pai (2009) ont évalué les connaissances spatiales anciennes (quartier autour de leur résidence) et les performances d'apprentissage d'un nouvel environnement chez des patients atteints de DTA. Dans leur premier test en RV, ils ont utilisé une arène virtuelle dans une tâche analogue

à la piscine de Morris (trouver une plateforme invisible dans une arène comportant des repères visuels sur les parois) et confirmé le déclin de l'apprentissage de nouveaux environnements dans la DTA. Ils ont également montré une préservation de la mémoire spatiale ancienne du quartier proche de leur résidence, par une tâche de dessin de carte. Dans leur seconde expérience, les positions relatives de bâtiments présents dans leur environnement familier ont été transposées dans l'arène virtuelle (les photos de deux bâtiments familiers posés sur les murs de l'arène), le but étant de retrouver la position de leur maison, transposée dans cette arène. Le premier essai servait à tester leur mémoire topographique ancienne du quartier proche de leur résidence, et les cinq suivants à évaluer leurs capacités d'apprentissage. Ils ont obtenu des résultats équivalents pour le premier essai, mais une diminution des performances pour les sessions suivantes. Leurs résultats confirment le déclin de la mémoire spatiale antérograde et la préservation de la mémoire spatiale rétrograde dans la DTA déjà évoqués dans la littérature (Teng & Squire, 1999 ; Rosenbaum, Gao, Richards, Black & Moscovitch, 2005). Dans une étude de cas, Burgess, Trinkler, King, Kennedy & Cipolotti (2006) ont étudié la mémoire topographique d'un patient atteint de DTA à l'aide d'un environnement urbain virtuel. Différentes mesures étaient collectées concernant le fonctionnement neuro-cognitif de ce patient (épreuves visuo-spatiales, visuo-perceptives, de calcul, de mémoire des visages, de mémoire verbale, du fonctionnement exécutif) ainsi que celles issues de l'application RV avec des tâches de mémoire de type « wayfinding », reconnaissance de repères ou de scènes. Sur les mesures neuro-cognitives, ce patient présentait des performances dans la norme excepté pour la tâche de reconnaissance de visages. Sur les épreuves virtuelles, la reconnaissance de repères familiers et non familiers était préservée. Par contre, le patient souffrait de difficultés de mémoire de route, dès lors qu'un changement de point de vue était introduit entre l'apprentissage et le rappel, et ceci qu'il s'agisse d'atteindre des positions dans l'EV ou d'en reconnaître des scènes 3D. Ces résultats ont été interprétés par les auteurs comme un déficit sélectif de la composante « allocentrique » (représentation spatiale configurationnelle permettant les transformations nécessaires aux changements de perspective) de la mémoire spatiale contrastant avec la préservation de la composante egocentrique (représentation spatiale de type « route »). Ce déficit sélectif est également vu par les auteurs comme lié à l'atteinte du lobe temporal médian et comme à l'origine des difficultés de navigation de ce patient (Spiers & Maguire, 2007; Byrne et al., 2007; Burgess, 2008). Néanmoins, comme un déficit de l'acquisition des représentations de type « route » dans la DTA a été également révélé d'autres études en conditions réelles (Cherrier et al., 2001; Monacelli et al., 2003 ; Uc et al., 2004), des études en RV ont exploré cette piste. Par exemple, Zakzanis et al. (2009) ont étudié les performances de sujets jeunes et âgés et de deux patients souffrant d'une DTA probable, dans une tâche de mémoire comportant deux routes : la première route (A) est apprise quatre fois, et une seconde route (B), une seule fois, faisant interférence avec la première. Après la phase d'apprentissage, les participants ont été soumis à une phase de rappel libre de la route (A) en rappels immédiat et différé. Une tâche de reconnaissance leur a également été administrée. Notons la similitude de procédure avec les tests neuropsychologiques classiquement utilisés pour évaluer la mémoire verbale (eg., CVLT, California Verbal Learning Test, Delis, Kramer, Kaplan & Ober, 1987). Les deux patients ont obtenu des résultats similaires au groupe de personnes âgées pour la tâche de reconnaissance mais des résultats différents pour les mesures relatives aux tâches de rappel libre des routes A et B, suggérant un déficit touchant la mémoire de route chez les patients DTA. De façon similaire, Widmann, Beinhoff & Riepe (2010) ont évalué la mémoire de type « route » : les sujets devaient visualiser une route (3 changements de directions) dans un quartier virtuel (7 blocks) comportant des bijouteries, avec l'instruction explicite de retenir le nom des bijouteries. Cet apprentissage a été réalisé cinq fois. Ils ont ensuite été évalués sur différentes tâches verbales et spatiales: rappel libre du

nom des magasins (mémoire verbale), dessin du parcours sur une feuille représentant les différents blocs du quartier, reconnaissance des magasins (mémoires verbale et spatiale), positionnement de photos de magasins sur un plan vide (mémoire spatiale), dénomination des magasins (verbale). Concernant les tâches « spatiales », les personnes atteintes par la DTA ont obtenu des performances inférieures pour les tâches de positionnement des photos et pour la seconde tâche de dessin (quatrième apprentissage), suggérant une atteinte de la mémoire spatiale dans ses deux composantes « ego- et allocentrique » chez ces patients. Notons que la reconnaissance de scènes visuelles était préservée mais les auteurs ont admis que cette tâche était implicite (forme de mémoire pouvant être préservée dans la DTA).

Ces données concernant la mémoire spatiale prises ensemble montrent les avancées permises par la RV notamment en termes de caractérisation des mécanismes à l'origine de la désorientation topographique des patients DTA. En effet, elles montrent une altération prépondérante des mécanismes d'acquisition et d'utilisation de représentations spatiales (peut-être, plus de nature allocentrique) et confirment la préservation de la mémoire topographique rétrograde (souvenirs anciens d'environnements). Un point restant à éclaircir par les prochaines études sera la relation entre le déclin des performances dans les différentes tâches de mémoire spatiale (mettant en jeu les représentations de type « landmark », « route » et « survey »), l'étendue des lésions chez ces patients et la sévérité de la démence (Blennow et al., 2006). En effet, les lésions du lobe temporal médian en début de maladie pourrait affecter l'acquisition de représentations spatiales allocentriques (Parslow et al., 2004 ; pour revue, Burgess, 2008) pour ensuite avec l'avancée dans la maladie atteindre l'acquisition de représentations de type « Route » (Maguire, Frackowiak & Frith, 1997; Voermans et al., 2004 ; par exemple). Dans la même perspective, les études à venir en RV pourrait également questionner le rôle des mécanismes d'intégration de trajet dans les troubles de l'orientation spatiale des patients DTA. En effet, si ces mécanismes ont été identifiés comme altérés dans la DTA, et notamment les mécanismes du traitement du flux optique (Duffy, Tetewsky & O'Brien, 2000 ; Duffy et al., 2004 ; Kavcic & Duffy, 2003; Mapstone, Steffenella & Duffy, 2003; Mapstone et al., 2008 ; Tetewsky & Duffy, 1999), des travaux rapportent que l'altération de ces mécanismes pourrait faire suite à celle des mécanismes de la mémoire spatiale conformément à la progression des lésions de la DTA, allant des structures médio-temporales vers d'autres régions corticales telles que le cortex pariétal (Blennow et al., 2006), largement impliqué dans les mécanismes d'intégration de trajet basés sur le flux optique (Duffy et al., 2000 ; 2004). Aussi, comme pour les études en RV sur le vieillissement cognitif, sont attendus des travaux sur le rôle des altérations attentionnelles et exécutives, leur rôle ayant déjà été évoqué dans les difficultés de navigation dans la DTA (Cocchini, Della Sala, Logie, Pagani, Sacco & Spinnler, 2004 ; Sheridan & Hausdorff, 2007 ; voir aussi, par exemple, les difficultés de double-tâches locomotrices et cognitives : Sheridan, Solomont, Kowall, Hausdorff, 2003 ; Beauchet & Berrut, 2006). Des études couplant la RV aux techniques de neuro-imageries seront certainement riches d'informations tant dans une approche multifactorielle (mémoire spatiale, intégration de trajet, attention et fonctions exécutives) que dans une approche neuro-fonctionnelle (corrélats neuronaux et progression lésionnelles de la DTA) pour comprendre les troubles de l'orientation et de la navigation rencontrés dans la DTA.

- *Intérêt de la RV pour le diagnostic précoce et dépistage de la DTA*- Un autre objectif des études en RV est le dépistage et le diagnostic précoce de la DTA. En effet, l'apparition précoce d'une désorientation topographique chez les patients atteints de démence de type Alzheimer (Henderson et al., 1989 ; Monacelli et al., 2003 ; Pai & Jacobs, 2004), sa relation supposée avec le déclin mnésique et le fonctionnement de l'hippocampe (Blennow et al., 2006; Burgess, 2008 ; Moffat et al., 2006 ; Spiers & Maguire, 2007 ; pour revue, voir Iachini

et al., 2009 ; Vlcek, 2011) ont conduit certains auteurs à suggérer que l'altération des performances de mémoire spatiale mettant en jeu les représentations spatiales allocentriques pouvaient être des marqueurs comportementaux d'une évolution vers une DTA (DeIpolyi et al., 2009 ; pour revue, Moffat, 2009). Le TCL (Trouble Cognitif Leger ou Mild Cognitif Impairment en anglais) est considérée, par certains auteurs, comme un état intermédiaire entre le vieillissement normal et la démence (Petersen et al., 2001). Différentes formes de TCL ont été décrites, amnésique et non amnésique, simple et multi-domaines, etc. et chacune de ces formes pourrait représenter un stade prodromal de démence. Plus précisément, la forme «amnésique-hippocampique » correspondrait à un stade précoce de DTA (Dubois & Albert, 2004; Gauthier et al., 2006 ; Petersen et al., 2001). Quelques études ont donc examiné les performances de mémoire spatiale chez différentes formes de TCL ainsi que chez des personnes atteintes une DTA (Hort, et al., 2007; Kalova et al., 2005 ; Laczo et al., 2009 ; 2010 ; 2011). Et, en effet, dans ces études, il a été rapporté que l'altération de la mémoire spatiale allocentrique était commune et spécifique aux patients DTA et aux personnes TCL de la forme «amnésique-hippocampique » des TCL, confirmant l'intérêt clinique de cette altération le diagnostic précoce et différentiel de la DTA.

Seulement quatre études ont été, à ce jour, menées à l'aide d'applications RV. D'abord, Cushman et al. (2008) ont comparé les capacités d'apprentissage dans un hôpital et dans sa réplique virtuelle chez des sujets jeunes, âgés, et des patients souffrant de TCL et de DTA. Différentes tâches ont été administrées aux participants, pour évaluer les différents niveaux de représentations spatiale selon le modèle L-R-S de Siegel et White. Les représentations de type « landmark » étaient sondées avec des tâches de reconnaissance de photos et de rappel libre des repères et objets, le niveau « route » l'était avec des tâches de rappel de directions prises le long de la route et de dessin du parcours). Enfin, les représentations « survey » (allocentriques ou configurationnelles) étaient évaluées avec des tâches d'estimation de direction de position donnée par des photos, positionnement de photos et de vidéos. D'abord, les résultats de cette étude révèlent que les différences inter-groupes sont identiques en condition réelles et en condition virtuelles, assurant ainsi une certaine similitude des mécanismes à l'étude en virtuel et en réel. Concernant les différences inter-groupes, les DTA comme les TCL étaient déficitaires comparés aux âgés sur toutes les tâches. Aussi, la tâche identifiée comme la plus discriminante entre sujets « contrôle » âgés et les personnes souffrant de TCL ou DTA était la tâche allocentrique de positionnement de photos sur une carte, suggérant une atteinte commune de l'acquisition des représentations allocentrique. Et, les performances à cette tâche à elles seules permettaient un classement correct de 85% entre les âgés contrôles et les âgés porteurs de TCL ou de DTA, témoignant du caractère discriminant de cette tâche pour le dépistage de la DTA. Ce résultat est conforté par les données rapportées par deux autres études en RV montrant que des tâches de mémoire spatiale de type « route » /égocentrique ne discriminent pas des sujets âgés contrôles vs. des porteurs de TCL (Lee et al., 2005; Tippett et al., 2009). Ceci est d'ailleurs cohérent avec l'étude de DeIpolyi et al. (2009) en milieu naturel qui avait montré que les TCL sur des tâches testant les connaissances de type « Route » ont des performances bien supérieures à celles des DTA, et que leurs performances étaient inversement relié à leur perte volumétrique hippocampique et du cortex pariétal.

Enfin, dans la dernière étude réalisée avec des dispositifs RV, Weniger, Ruhleder, Lange, Wolf et Irle (2011) se sont intéressé au caractère prédictif des tests de mémoire spatiale et de navigation dans des EV dans la conversion des TCL-amnésiques (n=29) en DTA (n=15), avec un suivi longitudinal de 6 ans et une mise en relation avec des mesures neuro-volumétriques (concernant principalement hippocampe, cortex pariétal, précuneus, et les ganglions de la base). Deux tests virtuels étaient utilisés : le premier, le « Virtual Park », propose une tâche supposée demander une stratégie de navigation « allocentrique » et, le second, le « Virtual

Maze », une stratégie de navigation « égocentrique » (ou procédurale ou de type « route »). Les personnes TCL-amnésiques présentaient d'une part, des performances déficitaires aux deux tests virtuels et d'autre part, des réductions volumétriques concernant l'hippocampe (bilatéral), le précuneus (droit) et pariétal (droit). Par contre, parmi les déficits prodromiques, seule la réduction volumétrique hippocampique prédisait la conversion TCL-DTA. D'un autre côté, les auteurs ont évoqué à la lumière d'autres travaux réalisés par eux-mêmes en imagerie neuro-fonctionnelle (Weniger et al., 2010), que le test virtuel dit allocentrique ne serait pas suffisamment spécifique de ce type de représentation, pouvant expliquer ainsi son manque à prédire les conversions TCL-DTA. Pour cette raison, ils concluent que les investigations sur la conversion TCL-DTA sur la base de tests virtuels de mémoire spatiale allocentrique doivent se poursuivre et surtout veiller à une meilleure spécificité, et notamment en s'inspirant des tâches allocentriques ayant fait leur preuve en termes de corrélats hippocampiques (Burgess, 2008 ; Spiers & Maguire, 2007 ; Wolbers & Büchel, 2005 ; Moffat, 2009 ; Vlcek, 2011).

Pour résumer, si ces premiers résultats en termes de valeur rajoutée de l'outil RV pour le dépistage et le diagnostic de la DTA, semblent prometteurs, d'autres études sont encore nécessaires pour confirmer que l'atteinte sélective de la composante allocentrique de la mémoire spatiale puisse être un marqueur comportemental caractéristique de la DTA ou prédictif de l'évolution des personnes souffrant de TCL vers la DTA.

Conclusion

Notre état de l'art révèle que dans le domaine de la cognition spatiale à petite échelle, de nombreux travaux sont encore attendus. Néanmoins, du côté de la MP, les quelques applications réalisées permettent déjà de confirmer le déclin des fonctions associées au fonctionnement du lobe pariétal et des ganglions de la base, comme la rotation mentale, la prise de perspective mentale, l'apprentissage visuo-moteur et le traitement du flux optique.

Concernant la cognition spatiale dans des grands espaces, les applications en RV, en particulier dans le vieillissement normal et la DTA suggèrent une altération de l'acquisition et de l'utilisation des représentations spatiales allocentriques, associée principalement à une altération du fonctionnement de l'hippocampe. Les études réalisées dans des labyrinthes suggèrent également une préférence pour les stratégies de navigation de type « procédurales » (dépendante du noyau caudé) chez les personnes âgées « contrôle ». Néanmoins, des études doivent encore confirmer ces résultats, et dans une approche multi-factorielle, il s'agit aussi de mieux comprendre dans le vieillissement, dans la DTA et la MP l'orchestration et la contribution respective des facteurs exécutifs, attentionnels, visuo-spatiaux (incluant la mémoire spatiale) et des facteurs sensorimoteurs (intégration de trajet et contrôle moteur) dans ces manifestations communes que sont les troubles de l'orientation et la navigation spatiale. Une cartographie de ces facteurs ayant pour guide et contrainte des données neurofonctionnelles permettra sans aucun doute une meilleure compréhension des difficultés propres au vieillissement, à la DTA et à la MP, voire même comme le clament certains auteurs, pourrait servir de marqueur diagnostique et différentiel du vieillissement pathologique (Moffat, 2009). Il est évident que de telles avancées ne seront possibles que par des études s'attaquant à la complexité des relations entre le contrôle sensorimoteur et cognitif mises en œuvre dans l'activité de navigation (Chrastil & Warren, 2012).

Une autre perspective essentielle aux travaux présentés sera l'inclusion d'une démarche de validation écologique des conclusions rendues par les études en RV. En effet, très peu d'études encore confrontent leurs résultats à des mesures en réel. Enfin, une autre énigme sera de comprendre pourquoi les troubles de l'orientation et de la navigation, quand ils sont présents chez la personne âgée, ne s'accompagne pas systématiquement d'une plainte ou

d'une auto-évaluation en relation comme nous avons pu le montré dans notre étude (Taillade et al., 2012).

Références:

Aarsland, D., Zaccai, J., Brayne, C. (2005). A systematic review of prevalence studies of dementia in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 20 (10), pp. 1255-1263.

Adamovich, S. V., Berkinblit, M. B., Hening, W., Sage, J. & Poizner, H. (2001). The interaction of visual and proprioceptive inputs in pointing to actual and remembered targets in Parkinson's disease. *Neuroscience*, 104 (4), pp. 1027-1041.

Albert, W. S., Reinitz, M. T., Beusmans, J. M., & Gopal, S. (1999). The role of attention in spatial learning during simulated route navigation. *Environment and Planning A*, (31), pp. 1459-1472.

Algase, D. L., Beattie, E. R. A., Song, J. -A., Milke, D., Duffield, C., Cowan, B. (2004). Validation of the Algase Wandering Scale (Version 2) in a cross cultural sample. *Aging and Mental Health*, 8 (2), pp.133-142.

Algase, D., Son, G. -R., Beel-Bates, C., Song, J., Lan Yao, Beattie, E., Leitsch, S. (2007). Initial psychometric evaluation of the wayfinding effectiveness scale. *Western Journal of Nursing Research*, 29 (8), pp. 1015-1032.

Allen, G. L., Kirasic, K. C., Dobson, S. H., Long, R. G., & Beck, S. (1996). Predicting environmental learning from spatial abilities: An indirect route. *Intelligence*, (22), pp. 327-355.

Allen, G. (1999). Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding: Bases for individual differences in spatial cognition and behavior. In R. G. Golledge (Ed.): *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*, (pp. 46-80). Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Allen, G. L., Kirasic, K. C., Rashotte, M.A., Haun, D. B. M. (2004). Aging and path integration skill: Kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Perception and Psychophysics*, 66 (1), pp. 170-179.

Amick, M. M., Schendan, H. E., Ganis, G., & Cronin-Golomb, A. (2006). Frontostriatal circuits are necessary for visuomotor transformation: Mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 44 (3), pp. 339-349.

Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D. & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17 (2), pp. 125-143.

Armstrong, C. L., & Cloud, B. (1998). The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal aging. *Neuropsychology*, 12 (2), pp. 208-217.

Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, pp. 829-839.

- Bakker, N. H. (2001). Spatial Orientation in Virtual Environments. *DUP Science Netherlands*.
- Baldwin, C. L. (2002). Designing in-vehicle technologies for older drivers: Applications of sensory-cognitive interaction theory. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 3 (4), pp. 307-329.
- Ballard, C. G., Mohan R. N., Handy, C. B. & Patel, A. (1991). Wandering in dementia sufferers. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 6 (8), pp. 611-614.
- Barberger-Gateau, P., Letenneur, L. & Pérès, K. (2004). Résultats PAQUID. http://www.isped.ubordeaux2.fr/RECHERCHE/paquid/2004_Resultats_PAQUID.pdf.
- Barrash, J. (1994). Age-Related Decline in Route Learning Ability. *Developmental Neuropsychology*, 10, pp.189-201.
- Bardy, B. G. (2006). Perception et régulation du mouvement humain : plaidoyer pour une biologie physique. *Journal de la Société de Biologie*, 200 (2), pp. 135-143.
- Baumann, S., Neff, C., Fetzick, S., Stangl, G., Basler, L., Vereneck, R., & Schneider, W. (2003). A virtual reality system for neurobehavioral and functional MRI studies. *Cyberpsychology and Behavior*, 6 (3), pp. 259-266.
- Beauchet, O. & Berrut, G. (2006). Gait and dual-task: Definition, interest, and perspectives in the elderly | [Marche et double tâche: Définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé]. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillissement*, 4 (3), pp. 215-225.
- Blennow, K., de Leon, M.J., & Zetterberg, H. (2006). Alzheimer's disease. *Lancet*, 368 (9533), 387-403.
- Bohbot, V. D., Iaria, G. & Petrides, M. (2004). Hippocampal function and spatial memory: Evidence from functional neuroimaging in healthy participants and performance of patients with medial temporal lobe resections. *Neuropsychology*, 18 (3), pp. 418-425.
- Braver, T. S. & West, R. (2008). Working memory, executive control and aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): *Handbook of aging and cognition*, 3rd ed., (pp. 311-372). New York: Psychology Press.
- Brodaty, H. & Moore, C. M. (1997). The clock drawing test for dementia of the Alzheimer's type: A comparison of three scoring methods in a memory disorders clinic. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 12 (6), pp. 619-627.
- Brooks, B. M., Attree, E. A., Rose, F. D., Clifford, B. R., Leadbetter, A. G. (1999). The Specificity of Memory Enhancement during Interaction with a Virtual Environment. *Memory*, 7 (1), pp. 65-78.
- Bruce, P. R. & Herman, J. F. (1983). Spatial knowledge of young and elderly adults: scene recognition from familiar and novel perspectives. *Experimental Aging Research*, 9, pp. 169-173.

- Burgess, N., Trinkler, I., King, J., Kennedy, A., & Cipolotti, L. (2006). Impaired allocentric spatial memory underlying topographical disorientation. *Reviews in the Neurosciences*, 17 (1-2), 239-251.
- Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, pp. 77-97.
- Burns, P. C. (1998). Wayfinding Errors While Driving. *Journal of Environmental Psychology*, 18 (2), pp. 209-217.
- Burns, P. C. (1999). Navigation and the mobility of older drivers. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, 54 (1), pp. 49-55.
- Carelli, L., Rusconi, M. L., Scarabelli, C., Stampatori, C., Mattioli, F., Riva, G. (2011). The transfer from survey (map-like) to route representations into Virtual Reality Mazes: Effect of age and cerebral lesion. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 8 (6).
- Castelli, L., Latini Corazzini, L. & Geminiani, G. C. (2008). Spatial navigation in large-scale virtual environments: Gender differences in survey tasks. *Computers in Human Behavior*, 24 (4), pp. 1643-1667.
- Cherrier, M. M., Mendez, M., & Perryman, K. (2001). Route learning performance in Alzheimer disease patients. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 14 (3), pp. 159-168.
- Chiu, Y. -C., Algase, D., Whall, A., Liang, J., Liu, H. -C., Lin, K. -N., & Wang, P. -N. (2004). Getting lost: Directed attention and executive functions in early Alzheimer's disease patients. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 17 (3), pp. 174-180.
- Chiu, Y. -C., Algase, D., Liang, J., Liu, H. -C., & Lin, K. -N. (2005). Conceptualization and measurement of getting lost behavior in persons with early dementia. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 20 (8), pp. 760-768.
- Chrastil, E. R. & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 19 (1), pp. 1-23.
- Christou, C. G. & Bühlhoff, H. H. (1999). View dependence in scene recognition after active learning. *Memory and Cognition*, 27 (6), pp. 996-1007.
- Cocchini, G., Della Sala, S., Logie, R. H., Pagani, R., Sacco, L., Spinnler, H. (2004). Dual task effects of walking when talking in Alzheimer's disease. *Revue Neurologique*, 160 (1), pp. 74-80.
- Cronin-Golomb, A. & Braun, A. E. (1997). Visuospatial dysfunction and problem solving in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 11 (1), pp. 44-52.
- Cronin-Golomb, A. & Amick, M. (2001). Spatial abilities in aging, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease. In F. Boller and S. F. Cappa (Eds.): *Handbook of neuropsychology*, 2 (6), pp. 119-143.

- Cushman, L. A., Stein, K. & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, *71* (12), pp. 888-895.
- Daividsdottir, S., Cronin-Golomb, A., & Lee, A. (2005). Visual and spatial symptoms in Parkinson's disease. *Vision Research*, *45* (10), pp. 1285-1296.
- Daividsdottir, S., Wagenaar, R., Young, D., & Cronin-Golomb, A. (2008). Impact of optic flow perception and egocentric coordinates on veering in Parkinson's disease. *Brain*, *131* (11), pp. 2882-2893.
- De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gardini, S. (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology*, *20* (6), pp. 807-821.
- De Rijk, M. C., Tzourio, C., Breteler, M. M. B., Dartigues, J. F., Amaducci, L., Lopez-Pousa, S., Manubens-Bertran, J. M., Alperovitch, A., & Rocca, W. A. (1997). Prevalence of parkinsonism and Parkinson's disease in Europe: The EUROPARKINSON collaborative study. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, *62* (1), pp. 10-15.
- DeIpoli, A. R., Rankin, K. P., Mucke, L., Miller, B. L., & Gorno-Tempini, M. L. (2007). Spatial cognition and the human navigation network in AD and MCI. *Neurology*, *69* (10), pp. 986-997.
- Dennis, N. A. & Cabeza, R. (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. In F. I. M. Craik, & T. A. Salthouse (Eds.): *The handbook of aging and cognition*, (pp. 311-372). Psychology Press, New York and Hove.
- Delis, D. C., Kramer, J. H., Kaplan, E., & Ober, B. A. (1987). *The California Verbal Learning Test*. (NY): Psychological Corporation.
- Doeller, C. F., King, J. A., & Burgess, N. (2008). Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and boundaries in spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105* (15), pp. 5915-5920.
- Dollinger, S. M. C. (1995). Mental rotation performance: age, sex, and visual field differences. *Developmental Neuropsychology*, *11*, pp.215–222.
- Doumas, M., Smolders, C. & Krampe, R. Th. (2008). Task prioritization in aging: Effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Experimental Brain Research*, *187* (2), pp. 275-281.
- Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W. M., Baumgartner, R. N., & Sutherland, R. J. (2003). The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex*, *13*, pp. 1344-1351.
- Driscoll, I., Hamilton D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior*, *47* (3), 326-335.

- Dubois, B., & Albert, M. L. (2004). Amnesic MCI or prodromal Alzheimer's disease? *Lancet Neurology* 3 (4), pp. 246-248.
- Duffy, C. J., Cushman, L., & Kavcic, V. (2004). Visuospatial disorientation in Alzheimer's disease: Impaired spatiotemporal integration in visual information processing. In A. Cronin-Golomb & P. R. Hof (Eds.), *Vision in Alzheimer's disease: Interdisciplinary Topics in Gerontology*. Basal, Karger, (pp.155-172).
- Duffy, C. J., Tetewsky, S. J., O'Brien, H. (2000). Cortical motion blindness in visuospatial AD. *Neurobiology of Aging*, 21 (6), pp. 867-869.
- Etchamendy, N. & Bohbot, V. D. (2007). Spontaneous navigational strategies and performance in the virtual town. *Hippocampus*, 17 (8), pp. 595-599.
- Etchamendy, N., Konishi, K., Pike, G. B., Marighetto, A. & Bohbot, V. D. (2011). Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: A study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus*. In press.
- Farrell, M. J., Arnold, P., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T. & MacManamon, M. (2003). Transfer of Route Learning from Virtual to Real Environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9 (4), pp. 219-227.
- Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*, 37 (2), pp. 275-292.
- Gallistel, C. R. & Cramer, A. E. (1996). Computations on metric maps in mammals, getting oriented and choosing a multi-destination route. *Journal of Experimental Biology*, 199, pp. 211-221.
- Gaulin, S. J. C. (1995). Does evolutionary theory predict sex differences the brain? In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences*, pp. 1211 - 1225. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A., Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, 11 (3), pp. 409-420.
- Gauthier, S., Reisberg, B., Zaudig, M., Petersen, R.C., Ritchie, K., Broich, K., Belleville, S., Brodaty, H., Bennett, D., Chertkow, H., Cummings, J. L., de Leon, M., Feldman, H., Ganguli, M., Hampel, H., Scheltens, P., Tierney, M. C., Whitehouse, P., & Winblad, B. (2006). Mild cognitive impairment. *Lancet*, 367 (9518), pp. 1262-1270.
- Graham, S. J., Quintin, G., Mraz, R., Hong, J., & Zakzanis, K. K. (2003). Combining virtual reality experiments with functional magnetic resonance imaging: Initial work assessing human spatial navigation. In B. K. Wiederhold, S. Bouchard & G. Riva (Eds.): *Annual review of cybertherapy and telemedicine*, pp. 83-96. Interactive Media Institute, San Diego.
- Gibson, J. J. (1950). *Perception of the Visual World* (Boston, MA: Houghton Mifflin).

- Grön, G., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., Tomczak, R. & Riepe, M. W. (2000). Brain activation during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, 3, pp. 404-408.
- Guilford, J. P. & Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford–Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, 32, pp. 24-34.
- Hartley, T., Maguire, E. A., Spiers, H. J. & Burgess, N. (2003). The well-worn route and the path less traveled: Distinct neural bases of route following and wayfinding in humans. *Neuron*, 37 (5), pp. 877-888.
- Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209 (1), pp. 49-58.
- Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. & Curtiss, G. (1993). Wisconsin Card Sorting Test manual (rev. ed.). Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.
- Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30 (5), pp. 425-447.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Schah & Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking* (pp.121-169). New York: Cambridge University Press.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T. & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Henderson, V. W., Mack, W., & Williams, B. W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Archives of Neurology*, 46, pp. 391-394.
- Herman, J. F., & Coyne, A. C. (1980). Mental manipulation of spatial information in young and elderly adults. *Developmental Psychology*, 16 (5), pp. 537-538.
- Hodges, J. R. (2006). Alzheimer's centennial legacy: Origins, landmarks and the current status of knowledge concerning cognitive aspects. *Brain*, 129 (11), pp. 2811-2822.
- Hölscher, C., Meilinger, T., Vrachliotis, G., Brösamle, M., Knauff, M. (2006). Up the down staircase: Wayfinding strategies in multi-level buildings. *Journal of Environmental Psychology*, 26 (4), pp. 284-299.
- Hölscher, C., Büchner, S. J., Meilinger, T., Strube, G. (2009). Adaptivity of wayfinding strategies in a multi-building ensemble: The effects of spatial structure, task requirements, and metric information. *Journal of Environmental Psychology*, 29 (2), pp. 208-219.
- Hort, J., Laczó, J., Vyhnálek, M., Bojar, M., Bureš, J., & Vlček, K. (2007). Spatial navigation deficit in amnesic mild cognitive impairment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (10), pp. 4042-4047.

- Iachini, T., Iavarone, A., Senese, V.P., Ruotolo, F., Ruggiero, G. (2009). Visuospatial memory in healthy elderly, AD and MCI: A review. *Current Aging Science*, 2 (1), pp. 43-59.
- Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: Variability and change with practice. *Journal of Neuroscience*, 23 (13), pp. 5945-5952.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G. & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196 (2), pp. 187-191.
- Iglói, K., Zaoui, M., Berthoz, A., Rondi-Reig, L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, 19 (12), pp. 1199-1211.
- Inagaki, H., Meguro, K., Shimada, M., Ishizaki, J., Okuzumi, H., & Yamadori, A. (2002). Discrepancy between mental rotation and perspective-taking abilities in normal aging assessed by Piaget's Three-Mountain Task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24 (1), pp. 18-25.
- Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive Psychology*, 52 (2), pp. 93-129.
- Israël, I., Grasso, R., Georges-François, P., Tsuzuku, T., & Berthoz, A. (1997). Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. I. Basic properties. *Journal of Neurophysiology*, 77 (6), pp. 3180-3192.
- Jansen, P., Schmelter, A., & Heil, M. (2010). Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Experimental Psychology*, 57 (1), pp. 54-60.
- Jheng, S. -S., & Pai, M. -C. (2009). Cognitive map in patients with mild Alzheimer's disease: A computer-generated arena study. *Behavioural Brain Research*, 200 (1), pp. 42-47.
- Jones, C. M., Braithwaite, V. A., & Healy, S. D. (2003). The evolution of sex differences in spatial ability. *Behavioral Neuroscience*, 117, pp. 403-411.
- Kalia, A. A., Legge, G. E., & Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, 37 (11), pp. 1677-1699.
- Kalová, E., Vlček, K., Jarolímová, E., & Bureš, J. (2005). Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: Corresponding results in real space tests and computer tests. *Behavioural Brain Research*, 159 (2), pp. 175-186.
- Kálmán, J., Maglóczky, E., & Janka, Z. (1995). Disturbed visuo-spatial orientation in the early stage of Alzheimer's dementia. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 21 (1), pp. 27-34.

- Kaskie, B. & Storandt, M. (1995). Visuospatial deficit in dementia of the Alzheimer type. *Archives of Neurology*, 52 (4), pp. 422-425.
- Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Attentional dynamics and visual perception: Mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Brain*, 126 (5), pp. 1173-1181.
- Kavcic, V., Fernandez, R., Logan, D., & Duffy, C. J. (2006). Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain*, 129 (3), pp. 736-746.
- Kearns, M. J., Warren, W. H., Duchon, A. P., & Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, 31, pp. 349-374.
- Kessels, R. P. C., Feijen, J. & Postma, A. (2005). Implicit and explicit memory for spatial information in Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 20 (2-3), pp. 184-191.
- Kimura, D. (2000). Sex and cognition. Cambridge, MA7 MIT Press.
- Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychology of Aging*, 6 (1), pp. 10-18.
- Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, 2, pp. 117-134.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Beall, A. C., Chance, S. S., & Golledge, R. G. (1998). Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. *Psychological Science*, 9 (4), pp. 293-298.
- Kosslyn, S. M., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L. & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35 (2), pp. 151-161.
- Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). A dissociation between object manipulation spatial ability and spatial orientation ability. *Memory and Cognition*, 29 (5), pp. 745-756.
- Laczó, J., Vlček, K., Vyhnálek, M., Vajnerová, O., Ort, M., Holmerová, I., Tolar, M., Anđel, R., Bojar, M. & Hort, J. (2009). Spatial navigation testing discriminates two types of amnesic mild cognitive impairment. *Behavioural Brain Research*, 202 (2), pp. 252-259.
- Laczó, J., Anđel, R., Vyhnálek, M., Vlček, K., Magerova, H., Varjassyova, A., Tolar, M., & Hort, J. (2010). Human analogue of the Morris water maze for testing subjects at risk of Alzheimer's disease. *Neurodegenerative Diseases*, 7, pp. 148-152.
- Laczó, J., Anđel, R., Vlček, K., Macoška, V., Vyhnálek, M., Tolar, M., Bojar, M., & Hort, J. (2011). Spatial Navigation and APOE in Amnesic Mild Cognitive Impairment. *Neurodegenerative Diseases*, (8), pp. 169-177.

- Larson, P., Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Van Rooyen, A., Kratz, K., Neumann, U., Kesselman, C., Thiebaut, M., Van Der Zaag, C. (1999). Gender issues in the use of virtual environments. *Cyberpsychology and Behavior* 2 (2), pp. 113-123.
- Latini-Corazzini, L., Nesa, M. P., Ceccaldi, M., Guedj, E., Thinus-Blanc, C., Cauda, F., Dagata, F., Péruch, P. (2010). Route and survey processing of topographical memory during navigation. *Psychological Research*, 74 (6), pp. 545-559.
- Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., Newman, M. C., Kaszniak, A. W., Nadel, L., & Jacobs, W. J. (2002). Older adults map novel environments but do not place learn: Findings from a computerized spatial task. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 9 (2), pp. 85-97.
- Lawton, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30 (11-12), pp. 765-779.
- Lee, A. C., Harris, J. P., & Calvert, J. E. (1998). Impairments of mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 36 (1), pp. 109-114.
- Lee, J. H., Wiederhold, B. K., Wiederhold, M. D., Kim, S. I., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee, S. -M., Kang, Y., Kim, D. Y., & Yu, T. (2003). A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *Cyberpsychology and Behavior*, 6 (4), pp. 383-388.
- Lee, J. -H., Mraz, R. P., Zakzanis, K. K., Black, S. E., Snyder, P. J., Kim, S. I., & Graham, S. J. (2005). Spatial Ability and Navigation Learning in a Virtual City. In B. K. Wiederhold, S. Bouchard & G. Riva (Eds.): *Annual review of cybertherapy and telemedicine*, (pp. 151-157). Interactive Media Institute, San Diego.
- Lepow, B., Höll, D., Zeng, L., Herzog, A., Behrens, K., & Mehdorn, M. (2002). Spatial behaviour is driven by proximal cues even in mildly impaired Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 40 (8), pp. 1443-1455.
- Li, K. Z. H., Krampe, R. Th., & Bondar, A. (2005). An ecological approach to studying aging and dual-task performance. In R. W. Engle, G. Sedek, U. von Hecker, & D. N. McIntosh (Eds.) *Cognitive limitations in aging and psychopathology: Attention, working memory, and executive functions* (pp. 190–218). New York: Cambridge University Press.
- Lindenberger, U., Marsiske, M., Baltes, P. B. (2000). Memorizing while walking: Increase in dual-task cost from young adulthood to old age. *Psychology and Aging*, 15 (3), pp. 417-436.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child development*, 56 (6), pp. 1479-1498.
- Lipman, P. D. (1991). Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information. *Psychology and Aging*, 6, pp. 128-133.
- Lipman, P. D. & Caplan, L. J. (1992). Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram, *Psychology and Aging*, 7, pp. 435-442.

- Liu, I., Levy, R. M., Barton, J. J. S., Iria, G. (2011). Age and gender differences in various topographical orientation strategies, *Brain Research, 1410*, pp. 112-119.
- Lohman, D. F. (1993). Spatial ability and g. In I. Dennis & P. Tapsfield (Eds.), *Human abilities: Their nature and measurement*, pp. 97-116. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers, 31* (4), pp. 557-564.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G. & Philbeck, J. W. (1999). Human Navigation by path integration. In R. G. Golledge (Ed.): *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*, (pp. 125-151). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Lorenz, C. A., & Neisser, U. (1986). Ecological and psychometric dimensions of spatial ability (Rep. No. 10). *Emory Cognition Project*, Atlanta, GA7 Emory University.
- Lövdén, M., Herlitz, A., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., Lindenberger, U. (2007). Quantitative and qualitative sex differences in spatial navigation: Cognition and Neurosciences. *Scandinavian Journal of Psychology, 48* (5), pp. 353-358.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A. & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging, 20* (4), pp. 683-694.
- Mack, J. L., & Patterson, M. B. (1995). Executive dysfunction and Alzheimer's disease: Performance on a test of planning ability, the Porteus Maze Test. *Neuropsychology, 9* (4), pp. 556-564.
- Magliano, J. P., Cohen, R., Allen, G. L., & Rodrigue, J. R. (1995). The impact of a wayfinder's goal on learning a new environment: Different types of spatial knowledge as goals. *Journal of Environmental Psychology, (15)*, pp. 65-75.
- Maguire, E. A., Frackowiak, R. S. J. & Frith, C. D. (1997). Recalling routes around London: Activation of the right hippocampus in taxi drivers. *Journal of Neuroscience, 17* (18), pp. 7103-7110.
- Maguire, E. A., Burgess, N., Donnett, J. G., Frackowiak, R. S. J., Frith, C. D., & O'Keefe, J. (1998). Knowing Where and Getting There: A Human Navigation Network. *Science, 280* (5365), pp. 921-924.
- Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E., & Moffat, S. D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research, 205* (1), pp. 88-95.
- Mapstone, M., Dickerson, K. & Duffy, C. J. (2008). Distinct mechanisms of impairment in cognitive ageing and Alzheimer's disease. *Brain, 131* (6), pp. 1618-1629.
- Mapstone, M., Steffenella, T. M., & Duffy, C. J. (2003). A visuospatial variant of mild cognitive impairment: Getting lost between aging and AD. *Neurology, 60* (5), pp. 802-808.

- May, M. (2004). Imaginal perspective switches in remembered environments: Transformation versus interference accounts. *Cognitive Psychology*, 48, pp. 163-206.
- Meilinger, T. (2008). The Network of Reference Frames Theory: A Synthesis of Graphs and Cognitive Maps. [In: Freksa, C., Newcombe, N. S., Gärdénfors, P., Wölfl, S. (eds.) *Spatial Cognition VI*. LNCS, vol. 5248, pp. 344–360]. Springer, Heidelberg.
- Messier, J., Adamovich, S., Jack, D., Hening, W., Sage, J., & Poizner, H. (2007). Visuomotor learning in immersive 3D virtual reality in Parkinson's disease and in aging. *Experimental Brain Research*, 179 (3), pp. 457-474.
- Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B. & Fernández, G. (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage*, 22 (4), pp. 1503-1514.
- McGee, J. S., Van Der Zaag, C., Buckwalter, J. G., Thiebaut, M., Van Rooyen, A., Neumann, U., Sisemore, D., & Rizzo, A. A. (2000). Issues for the assessment of visuospatial skills in older adults using virtual environment technology. *Cyberpsychology and Behavior*, 3 (3), pp. 469-482.
- McShane, R., Gedling, K., Keene J., Fairburn, C., Jacoby, R., & Hope, T. (1998). Getting lost in dementia: a longitudinal study of a behavioral symptom. *International Psychogeriatrics* 10 (3), pp. 253-260.
- Moffat, S. D., Hampson, E., & Hatzipantelis, M. (1998). Navigation in a "Virtual" Maze: Sex differences and correlation with psychometric measures of spatial ability in humans. *Evolution and Human Behavior*, 19 (2), pp. 73-87.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22 (5), pp. 787-796.
- Moffat, S. D., & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience*, 116 (5), pp. 851-859.
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, 27 (7), pp. 965-972.
- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17 (6), pp. 1274-1282.
- Moffat, S.D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.
- Mohler, J. L. (2006). Examining the Spatial Ability Phenomenon from the Student's Perspective. *Unpublished doctoral thesis Purdue*, University, West Lafayette, Indiana.
- Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's disease: The remembrance of things passed. *Neurology* 61 (11), pp. 1491-1497.

- Money, I., Alexander, D., & Walker, H. T. (1965). Manual: Standardized road-map test of direction sense. Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Montello, D. R. (1993). Scale and multiple psychologies of space. In A. U. Frank, & I. Campari (Eds.), *Spatial information theory: a theoretical basis for GIS. Proceedings of COSIT '93. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 716 (pp. 312 – 321). Berlin: Springer-Verlag.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. In M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems* (pp. 143–154). New York: Oxford University Press.
- Montello, D. R. (2005). Navigation. In P. Schah & Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking* (pp. 257-294). New York: Cambridge University Press.
- Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., Self, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American Geographers* 89 (3), pp. 515-534.
- Montgomery, P., Silverstein, P., Wichmann, R., Fleischaker, K., & Andberg, M. (1993). Spatial Updating in Parkinson's Disease. *Brain and Cognition*, 23 (2), pp. 113-126.
- Moore, V., & Wyke, M. (1984). Drawing disability in persons with senile dementia. *Psychological medicine*, 14, pp. 97-105.
- Morganti, F., Marrakchi, S., Urban, P. P., Iannocari, G. A. & Riva, G. (2009). A virtual reality based tool for the assessment of "survey to route" spatial organization ability in elderly population: Preliminary data. *Cognitive Processing*, 10 (suppl. 2), pp. 257-259.
- Morris, R. G. M., Garrud, P., Rawlins, J. N. P., & O'Keefe, J. (1982). Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature*, 297, pp. 681-683.
- Morris, R. G., & Kopelman, M. D. (1986). The memory deficits in Alzheimer-type dementia: a review. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 38 (4), pp. 575-602.
- Mraz, R., Hong, J., Quintin, G., Richard Staines, W., McIlroy, W. E., Zakzanis, K. K., & Graham, S. J. (2003). A platform for combining virtual reality experiments with functional magnetic resonance imaging. *Cyberpsychology and Behavior*, 6 (4), pp. 359-368.
- Neider, M. B., Gaspar, J.G., McCarley, J. S., Crowell, J. A., Kaczmariski, H. & Kramer, A. F. (2011). Walking and Talking: Dual-Task Effects on Street Crossing Behavior in Older Adults. *Psychology and Aging*, 26 (2), pp. 260-268.
- 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), pp. 86-93.

- O'Brien, H. L., Tetewsky, S. J., Avery, L. M., Cushman, L. A., Makous, W., & Duffy, C. J. (2001). Visual mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Cerebral Cortex*, *11* (11), pp. 1083-1092.
- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Oxford University Press.
- Packard, M. G., Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, *25*, pp. 563-593.
- Pai, M. -C., & Jacobs, W. J. (2004). Topographical disorientation in community-residing patients with Alzheimer's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *19* (3), pp. 250-255.
- Parslow, D. M., Rose, D., Brooks, B., Fleminger, S., Gray, J. A., Giampietro, V., Brammer, M. J., Williams, S., Gasston, D., Andrew, C., Vythelingum, G. N., Ioannou, G., Simmons, A., & Morris, R. G. (2004). Allocentric spatial memory activation of the hippocampal formation measured with fMRI. *Neuropsychology* *18* (3), pp. 450-461.
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., Rizzo, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, *42* (4), pp. 555-562.
- Parush, A. & Berman, D. (2004). Navigation and orientation in 3D user interfaces: The impact of navigation aids and landmarks. *International Journal of Human Computer Studies*, *61* (3), pp. 375-395.
- Passini, R., Rainville, C., Marchand, N., & Joanne, Y. (1995). Wayfinding in dementia of the Alzheimer type: planning abilities. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *17*(6), pp. 820-832.
- Péruch, P., Vercher, J., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, *7*, pp. 1-20.
- Petersen, R. C., Stevens, J. C., Ganguli, M., Tangalos, E. G., Cummings, J. L., & DeKosky, S. T. (2001). Practice parameter: Early detection of dementia: Mild cognitive impairment (an evidence-based review). *Neurology*, *56* (9), pp. 1133-1142.
- Plancher, G., Nicolas, S., & Piolino, P. (2008). Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: Study in aging. *Psychologie et Neuropsychiatrie du Vieillessement*, *6* (1), pp. 7-22.
- Plancher G., Gyselinck V., Nicolas S., Piolino P. (2010). Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology*, *24* (3), pp. 379-390.
- Poldrack, R. A., Packard, M. G. (2003). Competition among multiple memory systems: Converging evidence from animal and human brain studies. *Neuropsychologia*, *41* (3), pp. 245-251.

- Previc, F. (1998). The neuropsychology of 3D space. *Psychological Bulletin*, 124(2), pp. 123-164.
- Pugnetti, L., Mendozzi, L., Brooks, B. M., Attree, E. A., Barbieri, E., Alpini, D., Motta, A. & Rose, D. F. (1998). Active versus passive exploration of virtual environments modulates spatial memory in MS patients: A yoked control study. *Italian Journal of Neurological Sciences*, 19 (6 suppl.), pp. S424-S430.
- Rainville, C., Passini, R., & Marchand, N. (2001). A multiple case study of wayfinding in dementia of the Alzheimer type: Decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 8 (1), pp. 54-71.
- Rainville, C., Marchand, N., & Passini, R. (2002). Performances of patients with a dementia of the Alzheimer type in the Standardized Road-Map test of Direction Sense. *Neuropsychologia*, 40 (5), pp. 567-573.
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thieboux, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25 (8), pp. 1169-1177.
- Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory and Cognition*, 27 (4), pp. 741-750.
- Riecke, B. E., Van Veen, H. A. H. C., & Bühlhoff, H. H. (2002). Visual homing is possible without landmarks: A path integration study in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11 (5), pp. 443-473.
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., McGee, J. S., Bowerly, T., Van Der Zaag, C., Neumann, U., Thieboux, M., Kim, L., Pair, J., Chua, C. (2001). Virtual environments for assessing and rehabilitating cognitive/functional performance: A review of projects at the USC Integrated Media Systems Center. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10 (4), pp. 359-374.
- Rizzo, A. A., Schultheis, M., Kerns, K. A. & Mateer, C. (2004). Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14, pp. 207-239.
- Rodgers, M. K., Sindone, J. A. & Moffat, S. D. (2012). Effects of age on navigation strategy. *Neurobiology of Aging*, 33 (1), pp. 202.e15-202.e22.
- Rose, F. D., Brooks, B. M., & Attree, E. A. (2002). An exploratory investigation into the usability and usefulness of training people with learning disabilities in a virtual environment. *Disability and Rehabilitation*, 24 (11-12), pp. 627-633.
- Rosenbaum, R. S., Gao, F., Richards, B., Black, S. E. & Moscovitch, M. (2005). "Where to?" Remote memory for spatial relations and landmark identity in former taxi drivers with Alzheimer's disease and encephalitis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17 (3), pp. 446-462.

- Rosenzweig, E. S. & Barnes, C. A. (2003). Impact of aging on hippocampal function: Plasticity, network dynamics, and cognition. *Progress in Neurobiology*, 69 (3), pp. 143-179.
- Ruddle, R. A. & Jones, D. M. (2001). Manual and virtual rotation of a three-dimensional object. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7 (4), pp. 286-296.
- Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011a). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory and Cognition*, 39 (4), pp. 686-699.
- Salthouse, T. A. (1992). Reasoning and spatial abilities. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): *Handbook of aging and cognition*, (pp. 167-212). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132 (4), pp. 566-594.
- Sayers, H. (2004). Desktop virtual environments: A study of navigation and age. *Interacting with Computers*, 16 (5), pp. 939-956.
- Schellenbach, M., Lövdén, M., Verrel, J., Krüger, A., Lindenberger, U. (2010). Sensorimotor-cognitive couplings in the context of assistive spatial navigation for older adults. *GeroPsych: The Journal of Gerontopsychology and Geriatric Psychiatry*, 23 (2), pp. 69-77.
- Schoenfeld, R., Lehmann, W. & Leplow, B. (2010). Effects of age and sex in mental rotation and spatial learning from virtual environments. *Journal of Individual Differences*, 31 (2), pp. 78-82.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171 (3972), pp. 701-703.
- Sheridan, P. L., & Hausdorff, J. M. (2007). The role of higher-level cognitive function in gait: Executive dysfunction contributes to fall risk in Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 24 (2), pp. 125-137.
- Sheridan, P. L., Solomont, J., Kowall, N., Hausdorff, J. M. (2003). Influence of Executive Function on Locomotor Function: Divided Attention Increases Gait Variability in Alzheimer's Disease. *Journal of the American Geriatrics Society*, 51 (11), pp. 1633-1637.
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In H. W. Reese (Ed.): *Advances in child development and behavior* 10, (pp. 9-55). New York: Academic Press.
- Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychology and Aging*, 7 (3), pp. 389-394.
- Sjölander, M., Höök, K., Nilsson, L. -G., & Andersson, G. (2005). Age differences and the acquisition of spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an overview map as a navigation aid. *International Journal of Human Computer Studies*, 63 (6), pp. 537-564.

- Skelton, R. W., Bukach, C.M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22 (2), pp. 157-175.
- Skelton, R.W., Ross, S. P., Nerad, L., & Livingstone, S. A. (2006). Human spatial navigation deficits after traumatic brain injury shown in the arena maze, a virtual Morris water maze. *Brain Injury*, 20 (2), pp. 189-203.
- Slobounov, S. M., Zhang, K., Pennell, D., Ray, W., Johnson, B., & Sebastianelli, W. (2010). Functional abnormalities in normally appearing athletes following mild traumatic brain injury: A functional MRI study. *Experimental Brain Research*, 202 (2), pp. 341-354.
- Spiers, H. J. (2008). Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia*, 46, pp. 2106-2108.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17 (8), pp. 618-626.
- Spiers, H. J. & Maguire, E. A. (2008). The dynamic nature of cognition during wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 28, pp. 232-249.
- Stirk, J. A., & Foreman, N. (2005). Assessment of visual-spatial deficits in patients with Parkinson's disease and closed head injuries using virtual environments. *Cyberpsychology and Behavior*, 8 (5), pp. 431-440.
- Stolwyk, R. J., Triggs, T. J., Charlton, J. L., Iansek, R., Bradshaw, J. L. (2005). Impact of internal versus external cueing on driving performance in people with Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 20 (7), pp. 846-857.
- Stolwyk, R. J., Triggs, T. J., Charlton, J. L., Moss, S., Iansek, R., Bradshaw, J. L. (2006). Effect of a concurrent task on driving performance in people with Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 21 (12), pp. 2096-2100.
- Strayer, D. L. & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: Dual-Task Studies of Simulated Driving and Conversing on a Cellular Telephone. *Psychological Science*, 12 (6), pp. 462-466.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Dejos, M., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Gross, C., N'Kaoua, B. (2012). Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, DOI: 10.1080/13825585.2012.706247.
- Teng, E., & Squire, L. R. (1999). Memory for places learned long ago is intact after hippocampal damage. *Nature*, 400 (6745), pp. 675-677.
- Tetewsky, S. J., & Duffy, C. J. (1999). Visual loss and getting lost in Alzheimer's disease. *Neurology*, 52 (5), pp. 958-965.

- Thomas, K. G. F., Laurance, H. E., Luczak, S. E., & Jacobs, W. J. (1999). Age-related changes in a human cognitive mapping system: Data from a computer-generated environment. *Cyberpsychology and Behavior*, 2 (6), pp. 545-566.
- Tippett, W. J., Lee, J. -H., Zakzanis, K. K., Black, S. E., Mraz, R., & Graham, S. J. (2009). Visually navigating a virtual world with real-world impairments: A study of visually and spatially guided performance in individuals with mild cognitive impairments. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31 (4), pp. 447-454.
- Thorndyke, P., W., & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in Spatial Knowledge Acquired from Maps and Navigation. *Cognitive Psychology*, 14, pp. 560-589.
- Trick, L. M., Toxopeus, R., & Wilson, D. (2010). The effects of visibility conditions, traffic density, and navigational challenge on speed compensation and driving performance in older adults. *Accident Analysis and Prevention*, 42 (6), pp. 1661-1671.
- Turano, K. A., Munoz, B., Hassan, S. E., Duncan, D. D., Gower, E.W., Roche, K.B., Keay, L., Munro, C. A., West, S.K. (2010). Poor sense of direction is associated with constricted driving space in older drivers. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, 64 (3), pp. 348-355.
- Tversky, B., Morrison, J. B., Franklin, N., & Bryant, D. J. (1999). Three spaces of spatial cognition. *The Professional Geographer*, 51, pp. 516-524.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Shi, Q., & Dawson, J. D. (2004). Driver route-following and safety errors in early Alzheimer disease. *Neurology*, 63 (5), pp. 832-837.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S. W., Qian, S., Rodnitzky, R. L., & Dawson, J. D. (2005). Visual dysfunction in Parkinson disease without dementia. *Neurology*, 65 (12), pp. 1907-1913.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S. W., Sparks, J. D., Rodnitzky, R. L., & Dawson, J. D. (2007). Impaired navigation in drivers with Parkinson's disease. *Brain*, 130 (9), pp. 2433-2440.
- Vlček, K. (2011). Spatial Navigation Impairment in Healthy Aging and Alzheimer's Disease. In S. De La Monte (Eds.), *The Clinical Spectrum of Alzheimer's Disease - The Challenge Toward Comprehensive Diagnostic and Therapeutic Strategies*, pp. 75-100.
- Voermans, N. C., Petersson, K. M., Daudey, L., Weber, B., Van Spaendonck, K. P., Kremer, H. P. H., & Fernández, G. (2004). Interaction between the human hippocampus and the caudate nucleus during route recognition. *Neuron*, 43 (3), pp. 427-435.
- Voyer, D., Voyer, S. & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117 (2), pp. 250-270.
- Waller, D. (2000). Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6 (4), pp. 307-321.

- Waller, D., Loomis, J. M., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin and Review*, *11* (1), pp. 157-163.
- Waller, D., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2004). Using virtual environments to assess directional knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, *24* (1), pp. 105-116.
- Waller, D. (2005). The WALKABOUT: Using virtual environments to assess large-scale spatial abilities. *Computers in Human Behavior*, *21* (2), pp. 243-253.
- Waller, D., Bachmann, E., Hodgson, E., & Beall, A. C. (2007). The HIVE: A huge immersive virtual environment for research in spatial cognition. *Behavior Research Methods*, *39* (4), pp. 835-843.
- Walsh, D. A., Krauss, I. K., & Regnier, V. A. (1981). Spatial ability, environmental knowledge, and environmental use: The elderly. In I. S. Liben, A. H. Patterson, & N. Newcombe (Eds.), *Spatial representation and behavior across the life span*, (pp. 321-357). New York: Academic Press.
- Wechsler, D. (1945). A standardized memory scale for clinical use. *Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied*, *19*, 1945, 87-95.
- Wechsler, D. (1976). *Manual for the Weschsler Intelligence Scale – Revised (WISC-R)* San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (1987). WMS-R. Wechsler Memory Scale-Revised. San Antonio: Psychological Corporation.
- Weniger, G., Siemerikus, J., Schmidt-Samoa, C., Mehrlitz, M., Baudewig, J., Dechent, P., & Irle, E. (2010). The human parahippocampal cortex subserves egocentric spatial learning during navigation in a virtual maze. *Neurobiology of Learning and Memory*, *93* (1), pp. 46-55.
- Weniger, G., Ruhleder, M., Lange, C., Wolf, S., & Irle, E. (2011). Egocentric and allocentric memory as assessed by virtual reality in individuals with amnesic mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, *49* (3), pp. 518-527.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, *120* (2), pp. 272-292.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, *68* (1), pp.77-94.
- Widmann, C. N., Beinhoff, U., & Riepe, M. W. (2010). Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*. In press.
- Wiener, J. & Mallot, H. (2003). 'Fine-to-Coarse' Route Planning and Navigation in Regionalized Environments. *Spatial Cognition and Computation*, *3* (4), pp. 331-358.
- Wiener, J., Büchner, S., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, *9* (2), pp. 1-14.

Wierenga, C. E. & Bondi, M. W. (2007). Use of functional magnetic resonance imaging in the early identification of Alzheimer's disease. *Neuropsychology Review*, 17 (2), pp. 127-143.

Wilkniss, S. M., Korol, D. L., Gold, P. E., Jones, M. G., & Manning, C. A. (1997). Age-related differences in an ecologically based study of route learning. *Psychology and Aging*, 12 (2), pp. 372-375.

Wilson, P. (1997). Use of virtual reality computing in spatial learning research. In N. Foreman & N. Gillett (Eds.), *Handbook of spatial research paradigms and methodologies: Vol. I. Spatial cognition in the child and adult*, (pp. 181-206). Hove, U.K.: Psychology Press.

Wolbers, T., Weiller, C., Büchel, C. (2004). Neural foundations of emerging route knowledge in complex spatial environments. *Cognitive Brain Research*, 21 (3), pp. 401-411.

Wolbers, T., & Büchel, C. (2005). Dissociable retrosplenial and hippocampal contributions to successful formation of survey representations. *Journal of Neuroscience*, 25 (13), pp. 3333-3340.

Wolbers, T., & Hegarty, M., (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (3), pp. 138-146.

Woolley, D. G., Vermaercke, B., de Beeck, H. O., Wagemans, J., Gantois, I., D'Hooge, R., Swinnen, S. P. & Wenderoth, N. (2010). Sex differences in human virtual water maze performance: Novel measures reveal the relative contribution of directional responding and spatial knowledge. *Behavioural Brain Research*, 208 (2), pp. 408-414.

Zhang, K., Johnson, B., Pennell, D., Ray, W., Sebastianelli, W., & Slobounov, S. (2010). Are functional deficits in concussed individuals consistent with white matter structural alterations: combined FMRI & DTI study. *Experimental Brain Research*, 204 (1), pp. 57-70.

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), pp. CR140-CR150.

Apports de la réalité virtuelle aux approches neurocognitives du vieillissement normal ou pathologique: où en est-on réellement?

Psychologie française
(Soumis)

Déjos, M., PhD; Arvind Pala P.; Taillade M., N'Kaoua B. & Sauzéon H.

Key words : aging, dementia, virtual reality, cognitive disability

Résumé : L'émergence des applications neuropsychologiques de la réalité virtuelle (RV) a enrichi l'étude du vieillissement cognitif d'une approche plus écologique posant la question des différences entre cognition évaluée en laboratoire et cognition quotidienne. Elle combine en

effet, les qualités psychométriques des tests neuropsychologiques traditionnels et la validité écologique des questionnaires d'auto-évaluation des difficultés cognitives.

Dans ce contexte, la présente revue, propose de décrire l'intérêt de la RV dans le domaine de la neuropsychologie de la personne âgée. Les résultats attestent du statut de la cognition quotidienne comme champ de recherche à part entière où la RV, tient une place critique par le contrôle expérimental et la fiabilité des observations qu'elle permet. De plus, la qualité des mesures comportementales que propose la RV ainsi que sa possibilité de couplage avec la neuroimagerie permettent, de contribuer au diagnostic différentiel des démences, et de repenser la contribution des territoires cérébraux durant les activités cognitives.

Abstract : The emerging of neuropsychological applications of virtual reality has enriched the study of cognitive aging with a more ecological approach, questioning the difference between laboratory-based cognitive assessment and everyday cognition. Virtual reality allows to go past limits showed by traditional neuropsychological tests and self-administered questionnaires of cognitive difficulties by combining psychometric qualities of the first and the ecological validity of the second.

In this context, the present review aims to describe virtual reality-based technologies and their main interests in the field of neuropsychology of older adults, and as a secondary goal, to present a state of art of studies made in this field.

This review shows, that the applications of virtual reality allow to reproduce overall cognitive patterns associated with aging. When, results are discrepant, virtual reality-based measures seem to always worsen impairments compared traditional testing. So, in dynamic and naturalistic situations, elderly show more difficulties than in paper-and-pencil tests, indicating that the latter minimize the daily difficulties.

Together, these results are testifying the status of everyday cognition as a field of research in its own right whereby virtual reality, as an investigation tool, is critical for experimental control and reliability of observations. Besides, the quality of behavioral measures brought by virtual reality and the possibility, today, of its coupling with brain imaging techniques allows its contribution to differential diagnostic of dementias, and to rethink the contribution of brain areas involved in cognitive activities (Graham et al., 2003; Baumann et al., 2003).

Mots clés : Vieillesse, démence, réalité virtuelle, handicap cognitif.

Abréviations : DTA : démence de type Alzheimer ; MP : Maladie de Parkinson ; MCI : Mild Cognitive Impairment ou troubles cognitifs légers ; RV : réalité virtuelle ; EV : environnement virtuel ; AVQ : activités de la vie quotidienne ; IHM : interface homme-machine.

Avec le vieillissement démographique, les géronto-technologies sont aujourd'hui en plein essor, qu'elles soient mobiles (eg., téléphone, PDA, fauteuil roulant intelligent), embarquées (eg., technologies d'aide à la conduite automobile : GPS, affichage tête haute, détecteurs d'obstacle) ou au domicile (eg., domotique : électroménager intelligent, unité environnementale de surveillance) (Robert-Bobée, 2006). Lorsqu'elles concernent le handicap sensoriel, moteur ou cognitif, elles visent principalement deux objectifs : *la surveillance*, s'adressant à la réalisation de tâches courantes (via la transmission de données prélevées au domicile du patient) ; *la suppléance* où la technologie est au service de la personne pour l'aider à compenser ses difficultés (Rialle, 2007).

Du côté de la surveillance, les capteurs d'activités au domicile peuvent servir à l'identification précoce du handicap cognitif en renseignant sur les restrictions de participation aux activités de la vie quotidienne (AVQ) (Buracchio et Kaye, 2009). Ils pourraient également servir à prédire

l'évolution du statut cognitif de la personne en fonction de ses comportements (eg. Hayes et al., en 2008, rapportent un lien entre les changements d'allure dans la marche et une évolution en MCI de la personne âgée). Reconnue comme réelle avancée dans le recueil et le dépistage des tous premiers signes d'un handicap cognitif, la domotique de surveillance n'a pas pour vocation le diagnostic du statut cognitif de la personne âgée qui relève d'une expertise médicale soumise à des procédures cliniques bien définies (ANAES, 2000 ; DSM IV: American Psychiatric Association, 1994). Sur ce terrain d'autres technologies sont attendues, et en particulier les applications comportementales de la Réalité virtuelle (RV) dont les progrès et les résultats des recherches actuelles semblent extrêmement prometteurs (eg. Le Gall & Allain, 2001 ; N'Kaoua & Sauzéon, 2008 ; Rizzo et al. 2004). La présente revue de questions se propose d'en exposer les principales raisons, avec dans un premier temps, une description des technologies RV et leurs principaux intérêts dans le domaine de la neuropsychologie de la personne âgée, et, dans un deuxième temps, un état de l'art des résultats des études réalisées dans ce domaine.

LES APPLICATIONS RV ET LA NEUROPSYCHOLOGIE DE LA PERSONNE AGE

Selon Fuchs et al. (2006) « La finalité de la RV est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. ». La RV peut donc permettre, la simulation d'environnements et de tâches complexes proches des conditions « naturelles » servant de support à l'évaluation neuropsychologique de manière à rendre celle-ci plus écologique et réaliste.

L'examen neuropsychologique à visée clinique identifie les troubles et le handicap cognitifs que rencontre un patient. Chez la personne âgée, le diagnostic d'un syndrome démentiel est conditionné par la présence conjointe de troubles affectant au moins deux composantes cognitives et de leurs répercussions dans la sphère socioprofessionnelle (DSM IV, American Psychiatric Association, 1994). A l'heure actuelle, la mise en évidence des troubles et du handicap cognitifs repose sur des épreuves psychométriques distinctes. Du côté de l'analyse structurale des troubles cognitifs, les outils d'évaluation à disposition du clinicien sont des échelles structuro-cognitives offrant des mesures de l'efficacité cognitive générale (eg., MMSE, Folstein et al., 1975; Mattis, Mattis, 1976; WAIS-II, Wechsler, 1997) ou de certains processus spécifiques (eg., pour la mémoire, la MEM III, Wechsler, 2001; CVLT, Delis et al., 1987 ; Le Grober & Buschke, 1987). Ces mesures sont qualifiées d'objectives car elles répondent à des critères stricts de validation psychométrique. L'ensemble de ces mesures délivre une cartographie du fonctionnement structuro-cognitif de la personne mais souffre souvent d'une faible validité écologique compte tenu de la nature du matériel, des tâches et conditions d'administration qui sont souvent artificielles et éloignées des conditions de vie réelle (eg. apprentissage de liste de mots). Pour cette raison, le clinicien complète son examen, en y adjoignant des échelles le plus souvent sous la forme d'auto-questionnaires (Sikkes et al., 2009) dédiées à la plainte cognitive ou aux incapacités cognitives rencontrées au quotidien (eg., *Instrumental Activities of Daily Living* ou IADL, Lawton & Brody, 1969; CDS Derouesné & Guigot, 1995 ; QAM de Van der Linden et al., 1989). Ces mesures renseignent alors sur le handicap cognitif rapporté par la personne et/ou par un membre de son entourage. Comme tout questionnaire, ces échelles sont soumises à un biais de subjectivité auquel s'ajoute un pré-requis de capacités d'auto-jugement intactes qui peut faire défaut chez certains patients (eg., sous- ou sur-estimation due à des difficultés métacognitives et/ou psycho-affectives) (McDougall et al., 2006, Derouesné, 2005). Malgré cela, elles sont toujours recueillies pour leur grande richesse informationnelle dans le dépistage des pathologies et l'évolution du statut cognitif de la personne (eg., évolution d'un MCI en DTA) (eg. Bowman, 1996 ; Schultheis et al., 2002). En effet, leur portée pour le clinicien est double : d'abord, elles délivrent un contenu

écologique et expérientiel aux troubles observés, ensuite, elles constituent bien des fois les seuls signes cliniques inauguraux d'une neuropathologie (eg. maladies neuro-dégénératives associées au vieillissement comme la DTA, la maladie de Parkinson (MP) ou la démence fronto-temporale) (Résultats PAQUID : Barbeget-Gateau et al. 2004).

Dans la pratique, deux grands cas de figures peuvent alors se produire : soit, troubles et handicap sont observés simultanément, et le clinicien infère alors leur relation avec le risque d'un biais corrélationnel et donc d'un faux diagnostic positif d'un syndrome démentiel ; soit, un trouble ou un handicap est observé isolément, et le clinicien se risque alors au faux diagnostic négatif. Si une absence de handicap avec troubles avérés peut être le résultat de stratégies compensatoires mises à jour par l'examen structuro-cognitif, la présence d'un handicap sans trouble révèle souvent des problèmes de sensibilité de mesure des outils structuro-cognitifs, trop éloignés de la complexité des tâches à accomplir en situation naturelle (Pradat-Diehl et al. 2006). C'est pour cette raison que, tel un « facteur de risque », le handicap cognitif est considéré avec beaucoup d'attention par les cliniciens et chercheurs du domaine pour sa plus forte valeur de dépistage voire de pronostic de l'installation d'une neuropathologie dégénérative (eg. Millan-Calenti et al. 2010 ; Castilla-Rilo et al. 2007 ; Barberger-Gateau et al. 1999). Par exemple, 50 % des 50 ans et 66% des plus 75 ans présentent une plainte mnésique en l'absence de trouble réel et cette plainte s'avère être un véritable prédicteur de démence (Barbeget-Gateau et al. 2004).

Au total, la pratique clinique comme la recherche neuropsychologique souffre actuellement de la tension entre validité formelle et validité écologique des outils dont elle dispose. La RV promet aujourd'hui de réduire cette tension en proposant une réelle alternative entre une analyse des comportements peu structurée et peu spécifique en vie réelle et une analyse « dénaturée » en laboratoire via la simulation de tâches quotidiennes.

[insert figure 1]

Figure 1 : *Niveau de contrôle expérimental et niveau de validité écologique de trois outils d'évaluation : la RV, propose le meilleur compris pour réunir ces deux exigences cliniques - d'après Loomis et al. (1999).*

En effet, la RV répond à un besoin de rigueur psychométrique indispensable aux activités de recherche et aux activités cliniques. Les applications RV sont des modélisations informatiques où l'ensemble des paramètres de simulation est contrôlé et automatisé, qu'il s'agisse des caractéristiques physiques de l'environnement virtuel (EV) (nature visuelle, auditive, olfactive des stimuli, taille de l'environnement, degré de réalisme, nombre d'objets, texture, couleurs, etc.) ou du mode d'interaction sensori-motrice (eg., interacteur avec ou sans retour d'effort (Rizzo et al. 2004, tableau 1). Ainsi, depuis une dizaine d'années, se développent de nombreuses applications RV à visée neuropsychologique qui proposent des simulations d'AVQ qui jusque là étaient réalisées sous la forme de tests papier-crayon telles que la tâche des commissions de Martin (1972) ou encore la préparation d'un gâteau au chocolat (Baguena et al. 2006 ; pour revue, N'Kaoua & Sauzéon, 2008). Ces simulations offrent des mesures contrôlées, paramétrées, et standardisées, dans de bonnes conditions de sécurité optimisées pour les utilisateurs et ce lors d'AVQ simulées (Lee et al. 2003), permettant simultanément l'analyse structuro-cognitive des troubles et l'analyse fonctionnelle du handicap du sujet le cas échéant (Le Gall & Allain, 2001).

[insert tableau 1]

Tableau 1 : *Synthèse des avantages méthodologiques des outils RV dans le domaine des investigations neuropsychologiques (Adapté de Rizzo et al., 2004)*

Si les avantages offerts par la RV ont été rapidement valorisés dans les recherches menées auprès de l'adulte cérébro-lésé jeune (eg. Klinger, 2006), le développement des applications RV dédiées à la personne âgée a été ralenti par les contraintes dites d'« utilisateurs âgés », mais aujourd'hui ces dernières sont en passe d'être maîtrisées.

En effet, il y a 10 ans, McGee et al. (2000) dénonçaient quatre principales contraintes à l'utilisation de la RV auprès d'utilisateurs âgés, à savoir 1) La techno-phobie (anxiété à utiliser de nouveaux produits) ; 2) le statut perceptivo-moteur ; 3) le mal des simulateurs¹⁹; 4) la complexité d'utilisation des Interfaces Homme-Machine (IHM). Avec la présence accrue d'IHM et de technologies au quotidien, la techno-phobie autrefois associée au grand âge n'est plus réellement un obstacle, et les personnes âgées sont de plus en plus en mesure de les utiliser, même si certains aménagements dans la conception des IHM demeurent incontournables (eg. simplification des modalités de commande de l'interface) (Hawthorn, 2000 ; Zajicek, 2003 ; Sayers, 2004 ; Czaja et al., 2007). Ces aménagements, souvent en rapport avec le statut perceptivo-moteur et cognitif des âgés, sont issus du retour d'expérience des études en IHM menées depuis une dizaine d'années et font l'objet aujourd'hui de normes précises (normes ISO, 2008, pour détails, voir Charness, 2008). Notons que si les changements physiques liés à l'âge peuvent être importants, dans le domaine visuel, auditif, vestibulaire ou moteur (eg. Whitbourne, 1998), la RV par ses interfaces et interacteurs multisensoriels permet de contourner les incapacités perceptivo-motrices de la personne. Rappelons également que la perception 3D sollicitée dans les applications de RV est préservée jusqu'à un âge avancé (plus de 75 ans) (Yetka et al., 1998). Concernant le mal des simulateurs¹, il est rapporté dans la littérature qu'il s'agit d'un phénomène marginal (5%-10%) même s'il augmente un peu avec l'âge²⁰ (Liu et al. 1999 ; Arns & Cerney, 2005). Il est de plus possible, de minimiser ces effets secondaires en suivant des recommandations simples (pour revue voir, Morrow & Rogers, 2008) comme privilégier un mur d'affichage plutôt qu'un casque de visualisation (eg. Keszyues et al., 2000 ; Regan & Price, 1994).

La prise en compte de ces contraintes liées à l'utilisateur âgé permet aujourd'hui de disposer d'interfaces adaptées, simples et faciles d'utilisation, et donc qui sont mieux acceptées, c'est-à-dire considérées par les utilisateurs comme utiles (contentement et intérêt perçu) et utilisables (sentiment d'efficacité à l'utilisation) et alors moins anxigènes pour la personne (Czaja et al., 2007).

Ces progrès interfaciels amènent aujourd'hui au déploiement des applications RV dans les études neuro-comportementales puisque les personnes âgées sont à même de bien les tolérer mêmes avec peu d'expériences en matière d'utilisation d'outils numériques. De plus, l'aspect ludique et le sentiment d'efficacité étant importants, les personnes âgées manifestent un sentiment de satisfaction à l'utilisation de ce mode d'évaluation (pour revue Déjos et al., 2012).

VIEILLISSEMENT ET EVALUATION COGNITIVE PAR LA RV

De façon générale, les études en RV, relativement récentes dans le domaine du vieillissement, sondent, les fonctions cognitives les plus sensibles aux effets de l'âge (Sauzéon & N'Kaoua, 2008) : l'attention, les capacités visuo-spatiales, la mémoire épisodique, et les fonctions exécutives. Deux classes d'études se distinguent : celles visant une validation psychométrique des outils RV en proposant des applications qui répliquent les tests traditionnels avec l'objectif

¹⁹ Troubles résultant d'un conflit entre les informations perceptuelles reçues par les diverses modalités (visuelle, proprioceptives...) ou la réadaptation dont le sujet doit faire peuvent après l'utilisation de l'environnement virtuel. Les symptômes peuvent inclure des nausées, une fatigue oculaire, une désorientation, des problèmes de coordination perceptivo-motrice, ect. (Kennedy et al., 1992).

²⁰ Il n'y a pas de différence entre personnes âgées « contrôles » et personnes âgées avec démence concernant la présence de mal des simulateurs (Flynn et al. 2003).

d'en démontrer la similitude en termes de processus cognitifs mesurés ; et celles simulant des AVQ pour doter les tests psychométriques d'un contenu écologique ou pour explorer des domaines cognitifs jusque là peu accessibles avec les outils expérimentaux classiques (eg. la navigation). De plus, l'engouement pour les outils RV renvoie à leur bonne efficacité dans le diagnostic différentiel et au dépistage précoce des neuropathologies du vieillissement (MCI, la DTA et la MP) (Déjos et al. 2012). Ces trois objectifs sont abordés pour chaque grand domaine cognitif exploré dans les études utilisant la RV.

L'ATTENTION

L'attention concerne un ensemble de processus permettant d'allouer des ressources cognitives dont la mise en jeu peut être de nature exogène-*orientation réactive*-ou endogène-*orientation volontaire*- (Parasuraman, 1998). Parmi ces processus, on distingue l'attention soutenue (vigilance ou capacité à maintenir son attention sur un long intervalle de temps), l'attention divisée (capacité à partager son attention), et l'attention sélective (focalisation sur un stimulus ou un aspect d'un stimulus complexe ou bien d'une tâche cognitive et évitement ou inhibition des informations non pertinentes pour la tâche) (Lezak, 2004). Ces trois aspects de l'attention interagissent mais représentent des construits distincts qui trouveraient des corrélats neuroanatomiques également différents (Perry & Hodges, 1999 ; Posner & Petersen, 1990).

Dans le vieillissement normal, un déclin de l'attention est observé chez les personnes âgées incluant une réduction du champ attentionnel (Owsley et al. 1991; Pringle et al., 2004) et un ralentissement des mécanismes d'orientation et de recherche attentionnelle (Greenwood & Parasuraman, 1999). Les âgés ont également des performances moindres comparées à celles des jeunes sur des tâches d'attention sélective, d'inhibition (Chao & Knight, 1997 ; Andrés et al., 2006 ; voir également McDowd, 1997 pour revue) et d'attention divisée (Wright, 1981; Sekuler et al., 2000 ; Verghese et al., 2002). En revanche, l'effet de l'âge n'est pas toujours observé sur des tâches d'attention soutenue (eg. Parasuraman, 1989 ; Berardi et al., 2001). Ces effets caractéristiques de l'âge, sont le plus souvent majorés sur les applications RV adressant les processus attentionnels. Par exemple, Mager et al. (2005) ont utilisé le paradigme *oddball* (permettant de présenter des stimuli auditifs rares parmi des stimuli auditifs fréquents, et prédictibles lors d'une tâche de résolution de problème –ici, la tour de Hanoi-) sur un dispositif RV ainsi qu'une tâche similaire dans l'environnement réel. Les auteurs ont montré sur des mesures de potentiels évoqués que ni la latence ni l'amplitude de l'onde N100²¹ n'étaient significativement différents entre les jeunes et les âgés. Aucune différence liée à l'âge sur les tâches d'attention (i.e., détection d'un stimulus auditif rare au cours de la réalisation de l'épreuve 3D de la tour de Hanoi) n'est observée quelle que soit la condition de test, réelle ou RV. En revanche, une altération de la MMN²² se manifestait chez les personnes âgées par un temps de latence plus important comparé aux sujets jeunes et une réduction de l'amplitude de celle-ci dans la tâche virtuelle comparée à la tâche réelle. L'effet de l'âge sur la composante MMN est connu (Bertoli, et al. 2002), mais la RV semble accentuer cet effet. Aussi, cette étude en RV réplique l'absence d'effet de l'âge sur la N100 et révèle une majoration en condition

²¹ L'onde N100 est une composante précoce des potentiels évoqués qui se manifeste entre 80 et 120 ms après la détection d'un stimulus. Elle reflète à la mise en place de processus d'attention sélective (Hillyard & Anllo-Vento, 1998).

²² Sur une mesure de potentiels évoqués, la MMN (Näätänen et al., 1993) qui survient lorsqu'un stimulus inattendu rompt la régularité d'une série de stimuli dont le sujet a établi la prédictibilité et est supposé alors refléter un processus pré-attentionnel de détection d'un changement.

réaliste de l'effet d'âge sur la MMN, (ie. difficulté à prédire l'apparition d'un stimulus avec l'âge).

L'attention peut être évaluée de manière plus « située » encore, grâce par exemple à la simulation d'une activité de conduite automobile. Par ses enjeux sécuritaires et sa complexité d'étude en milieu naturel, l'activité de conduite a fait l'objet de nombreux travaux en RV et en particulier chez le sujet vieillissant (eg. Lee et al., 2003a, b ; Lee, 2006 ; Bieliauskas, 2005 ; Shechtman et al., 2007 ; Schwebel et al., 2007 ; Severson et al., 2007 ; Rogé & Pébayle, 2009 ; Tuttle, et al. 2009). Lee et al. (2003a) ont ainsi mis en évidence, une augmentation avec l'âge, du temps de détection de stimuli visuels pendant une situation de conduite en simulateur. Mapstone et al., (2001) indiquent que l'effet majoré de l'âge sur les performances attentionnelles serait imputable à la difficulté de la tâche en termes de complexité informationnelle de l'environnement simulé. Ces auteurs ont en effet examiné les patterns de fixations oculaires (nombre de fixations et leur durée) pour les stimuli distracteurs (statiques : immeubles, panneaux, etc., ou dynamique : voitures en mouvement) de sujets jeunes et âgés. Contrairement aux sujets jeunes qui fixaient la région centrale d'intérêt, les âgés effectuaient plus de saccades oculaires en direction des stimuli dynamiques provenant du champ visuel périphérique et fixaient plus longtemps cette région, montrant une plus grande sensibilité aux distracteurs environnementaux. Cette sensibilité accrue aux distracteurs a été retrouvée par Severson et al. (2007) où les participants jeunes et âgées devaient franchir des « portes » virtuelles apparaissant de chaque côté de la route et représentant des carrefours qui s'ouvraient ou se fermaient le long du trajet. Cent mètres avant l'apparition de la porte, des signaux « Go » ou « Stop » étaient présentés aux sujets afin qu'ils anticipent l'approche du carrefour. Les sujets devaient décider de la franchir (« Go ») pendant un temps limité avant qu'elle ne se ferme (« Stop »). Pendant le temps alloué à la décision, un distracteur visuel périphérique était présenté. Dans cette tâche, les âgés commettaient plus d'erreurs que les jeunes en présence des distracteurs (i.e., crash de la voiture contre la porte, allongement du temps mis pour traverser, variations dans l'accélération).

Ainsi, immergés dans un environnement dynamique, les personnes âgées sont plus sensibles aux distracteurs et donc moins performantes sur les tâches d'attention sélective.

Le même type de tâches, permet de mettre en évidence un effet du vieillissement sur les mesures d'attention divisée (Tuttle et al., 2009 ; Hoffman et al. 2005) ainsi qu'un ralentissement global des personnes âgées et une augmentation des erreurs telles que la mauvaise gestion des intersections (Liu et al., 1999 ; Lee et al. 2003 ; Shechtman et al., 2007).

Ces premiers résultats en RV révèlent que le déclin attentionnel lié à l'âge joue un rôle primordial dans leurs difficultés à accomplir des tâches complexes telles que la conduite automobile et qu'il est certainement sous-estimé dans les évaluations traditionnelles. Ceci s'expliquant probablement, par le caractère dynamique, continue et dense des informations délivrées en RV comme en vie réelle, qui met à mal les processus attentionnels –déficitaires chez la personne âgée- et entraîne des erreurs plus importantes.

Dans les neuropathologies du vieillissement, les troubles attentionnels sont fréquents. La DTA par exemple, est associée à une altération du mécanisme de désengagement (Parasuraman, et al. 1992) observée dans les tâches d'attention soutenue et divisée (Rizzo et al., 2000). Un déficit sur les tâches d'attention soutenue a également été montré dans la MP (Ballard et al., 2002). Ces désordres attentionnels participeraient au handicap quotidien des patients souffrant de démence (Bronnick et al., 2006) comme par exemple dans leurs activités de conduite automobile, et ce, chez les patients DTA (Parasuraman & Nestor, 1991 ; Fitten et al., 1995 ; Duchek et al., 1998) comme chez les patients MP (Wood et al., 2005 ; pour revue voir Klimkeit et al., 2009).

Dans ce contexte, l'une des ambitions des études en RV simulant la conduite, est d'identifier les difficultés des personnes dans un but sécuritaire mais aussi d'évaluer si ces difficultés en situation peuvent permettre d'inférer le statut cognitif de la personne.

Dans l'étude de Severson et al., (2007 ; présentée précédemment), des patients DTA commettaient significativement plus d'erreurs (ie. crash du véhicule, ou attente indéfinie pendant le temps d'ouverture de la porte) que les personnes âgées. Ces résultats sont confortés par ceux de Rizzo et al., (1997) qui rapportent que 29% des patients DTA étaient en situation accidentelle dans un simulateur de conduite alors qu'aucun âgé ne l'était. De plus, dans cette étude, les échelles traditionnelles de diagnostic de la DTA n'étaient pas prédictives de ces accidents, et donc du risque encouru par les patients. Plus récemment, Fritelli et al. (2009) ont rapporté que les échelles globales telles que le MMSE ne permettaient pas de prédire les performances de conduite des DTA contrairement à une mesure attentionnelle simple telle que le temps de réaction visuel. Selon Drachman et Swearer (1993), l'une des raisons de cette faible valeur prédictive des échelles de sévérité de la démence résiderait dans l'importante variabilité inter-individuelle quant à la qualité de la conduite automobile des patients (pour des résultats différents voir Cox et al., 1998 et Blackman et al., 2007).

Les mesures d'attention fournies par la RV semblent plus sensibles que les évaluations traditionnelles, sans perdre en spécificité. De manière très illustrative, l'étude de Drzezga et al. (2005), s'est intéressée à l'effet d'inhibition cross-modale²³ en situation de navigation virtuelle chez les patients MCI et DTA. Bien entendu, les mesures comportementales indiquaient une altération des performances en RV (temps de navigation) plus importante chez les DTA comparées à celles des patients MCI, elles-mêmes significativement plus importantes que celles des sujets âgés. Les mesures d'imagerie par TEP indiquaient une altération spécifique de l'inhibition cross-modale particulièrement prononcée chez les DTA et plus modérée pour les MCI. En effet, contrairement aux sujets contrôles, en plus d'une faible activation chez les MCI des aires cérébrales impliquées dans la navigation et une activation inexistante chez les DTA, l'imagerie montrait aussi une diminution de l'inhibition cross-modale chez les MCI alors qu'elle était totalement supprimée chez les DTA. Autrement dit, les aires corticales auditives non pertinentes pour cette tâche visuelle de navigation étaient activées de manière anarchique dans les groupes pathologiques. De plus, les scores au MMSE étaient significativement corrélés au taux de désactivation des aires auditives, suggérant que l'altération de l'inhibition cross-modale prédit le statut cognitif de la personne. Ainsi les outils RV permettent aussi de mettre en évidence des patterns neuropathologiques différents entre MCI et DTA pour une activité complexe, multi-composantes et en situation (i.e., navigation). Ce type de résultats laisse présager de nouvelles voies d'identification de marqueurs neurocomportementaux utiles au diagnostic différentiel.

Un certain nombre d'études a été également consacré aux mécanismes attentionnels chez les patients DTA ou MP sur des tâches simulées de conduite automobile (Uc et al., 2006, 2009 ; Stolwyk et al., 2006 ; Zesiewicz et al., 2002 ; Rizzo et al., 2011). Il a par exemple, été montré que lors d'une tâche de conduite dans de mauvaises conditions de visibilité, les déficits attentionnels des patients MP sont majorés comparés aux performances des âgés (Uc et al., 2009). Les mesures d'attention visuelle, de capacités visuo-constructives et de perception des mouvements sont apparus comme étant les meilleurs prédicteurs des performances de contrôle de trajectoire et des risques de collisions lors d'une conduite en faible visibilité chez les patients MP. Ces résultats ont été retrouvés en condition de visibilité normale (eg. Uc et al.

²³ L'inhibition cross-modale est un mécanisme particulier de l'attention sélective qui se manifeste lors de l'utilisation de la TEP (Tomographie par Emission de Positron) par une activation (augmentation du débit sanguin cérébral régional) des réseaux neuronaux impliqués fortement dans une tâche d'attention sélective spécifique à une modalité sensorielle et une désactivation des régions cérébrales spécifiques à d'autres modalités sensorielles et qui n'interviennent pas dans la tâche en cours.

2007 ; Ball et al., 1993 ; Rizzo et al., 1997, 2001 ; Owsley et al., 1998). Du côté de la DTA, récemment Rizzo et al. (2011) ont montré que les comportements déviants de conduite précédant le crash des patients DTA étaient prédits par leurs troubles visuo-spatiaux, attentionnels, et leur ralentissement dans le traitement de cibles mouvantes. De plus, alors que la corrélation entre les échelles de sévérité de la démence et les performances aux activités de conduite n'est parfois pas évidente chez les DTA, elle est en revanche systématiquement observée dans les études chez les MP en utilisant l'échelle unifiée d'évaluation de la MP (UPDRS motrice et AVQ), le H-Y²⁴ (Hoehn & Yahr, 1967) ou le MMSE. L'étude de Zesiewicz (2002) a par exemple révélé que la propension pathologique des MP à entrer en collision variait selon le degré de sévérité de la maladie. Les sujets MP qui avaient le score le plus bas au MMSE étaient également ceux qui avaient totalement arrêté de conduire et qui montraient le plus de collisions comparés aux âgés lors d'une activité de conduite simulée en RV. De même, un taux d'accidents maximum (90 %) correspondait au stade le plus avancé sur l'échelle H-Y de désordre moteurs associés à la MP tandis que le stade le plus faible correspondait à un taux d'accidents équivalent à celui constaté dans le vieillissement normal (20 %).

Ces premiers résultats soulignent l'intérêt de la RV pour l'étude des mécanismes attentionnels et de leurs répercussions dans les AVQ telles que la conduite automobile. Le caractère écologique et dynamique des mesures, rendant plus sensibles ces dernières pour la caractérisation des profils pathologiques dans le cadre du vieillissement pathologique.

CAPACITES VISUO-SPATIALES (VS)

Les capacités visuo-spatiales ont été décrites par Lohman (1993) comme l'aptitude à générer, retenir, récupérer et transformer une image visuelle bien structurée. Elles ne représentent pas un construit unique et ont été séparées en différents facteurs dont le nombre et la nature varient selon les auteurs (voir Hegarty & Waller, 2005 pour revue). La description la plus récente dissocie les aptitudes spatiales à *petite échelle* correspondant à la manipulation mentale d'objets et à *grande échelle* comme l'apprentissage et la navigation dans des grands espaces (Hegarty et al., 2006). Cette distinction s'appuie sur la faible corrélation rapportée entre les tests visuospatiaux de type « papier-crayon » (rotation mentale, tests de visualisation spatiale de Guilford & Zimmermann, ...) et les performances d'apprentissage spatial et de navigation en condition réelle, qui nécessitent d'intégrer un ensemble d'informations (visuelles, vestibulaires, proprioceptives...) permettant de construire une représentation interne de l'espace (de type « Route » ou de type « configurationnelle/carte cognitive») et d'effectuer des transformations ou des inférences afin de décrire, représenter ou naviguer dans cet espace (Hegarty et al., 2006).

L'étude de la cognition spatiale à grande échelle est certainement l'un des domaines d'étude ayant le plus bénéficié des outils RV (eg. Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010 ; Brooks et al., 1999 ; Waller et al., 2004 ; 2007 ; Moffat et al., 2002 ; 2006 ; 2007), puisque ces derniers offrent des conditions d'étude de la locomotion et de la navigation dans des grands espaces en 3D réalistes et contrôlés (quartier, maison, hôpital, supermarché...) (Wilson, 1998 ; Loomis et al., 1999). A cela, très rapidement, les études se sont dotées de dispositifs de couplage RV-imagerie fonctionnelle (Mraz et al. 2003 ; Graham et al., 2003 ; Baumann et al., 2003) afin d'interroger les corrélats neuro-anatomiques et fonctionnels des tâches de navigation, qui jusqu'alors étaient impossibles à investiguer (eg. Iaria et al., 2003 ; Spiers & Maguire, 2007 ; Doeller et al., 2008 ; Moffat et al., 2006 ; Meulenbroek et al., 2004 ; Antonova et al., 2009).

²⁴ Echelle évaluant les désordres moteurs (et non cognitifs), objectivant à la fois le trouble moteur et les incapacités du sujet au quotidien.

Vieillesse normale : *Cognition spatiale à petite échelle* : Quelle que soit l'aptitude considérée, un déclin lié l'âge est observé sur les tests « papier-crayon » classiques (Salthouse, 1992 ; Dollinger, 1995 ; Cronin-Golomb & Amick, 2001 ; De Beni et al., 2006 ; Inagaki et al., 2002). Les répliques RV du test de rotation mentale de Shepard & Metzler (1971) (Larson et al., 1999 ; McGee et al., 2000), du 3D road-and-frame test (McGee et al., 2000) ou d'autres tests comme les tâches de perception de profondeur, de poursuite manuelle dans un espace 3D (McGee et al., 2000) confirment toutes un déclin des performances lié à l'âge. Le Money Road Map Test (test de rotation mentale) (Money, 1965), a également été adapté en version RV (Morganti et al., 2009) et une corrélation entre l'âge des sujets et les performances obtenues a été répliquée. Ainsi, les répliques RV 3D de tests visuo-spatiaux à petite échelle reproduisent les patterns de résultats observés classiquement dans le vieillissement avec les tests « papier-crayon ». Les mesures en RV miment donc bien les mesures psychométriques pratiquées en 2D avec l'avantage de reposer sur du matériel permettant une inférence plus directe sur les capacités des personnes à traiter et manipuler les informations en 3D à petite échelle.

Cognition spatiale à grande échelle : La mémoire spatiale et la navigation dans des grands espaces souffrent également d'un effet de l'âge (pour revue, Moffat, 2009). Bien souvent, ces aptitudes à grande échelle sont évaluées à l'aide de tâches analogues à celle de la piscine de Morris²⁵ (Newman et al., 2000). Ce type de tâche a très vite trouvé un corollaire virtuel à partir duquel des études sur le vieillissement ont été réalisées, reproduisant le déclin classique lié à l'âge témoignant d'une modification des aptitudes spatiales à grande échelle affectant aussi bien la mémoire spatiale ou les stratégies de navigation (eg. Laurance et al., 2002 ; Moffat et Resnick, 2002; Driscoll et al., 2003, 2005 ; Sayers, 2004 ; Moffat et al., 2007 ; ushman et al., 2008 ; Kalia et al., 2008 Antonova et al., 2009; Head et Isom, 2010).

De manière plus intéressante, des EV plus réalistes ont été mis à l'étude avec pour objectif d'apprécier si le vieillissement produisait des effets différentiels selon l'aptitude spatiale à grande échelle considérée. Par exemple, des distinctions comme celle entre « mémoire spatiale de route vs. mémoire spatiale configurationnelle » ou encore celle entre « mémoire spatiale vs. stratégie navigationnelle » ont été investiguées. Dans tous les cas un déclin lié à l'âge est rapporté, qu'il s'agisse de tâches de mémoire de route (Lipman, 1991 ; Lipman & Caplan, 1992 ; Barrash 1994 ; Wilkniss et al., 1997 ; Monacelli et al., 2003 ; Cushman et al., 2008 ; Meulenbroek et al., 2004 ; Tippett et al., 2009; Zakzanis et al., 2009 ; Head et Isom, 2010) ou encore de mémoire configurationnelle (EV labyrinthes : Moffat et al., 2006, Head et Isom, 2010 ; EV bâtiments : Arbuckle et al., 1994 ; Foreman et al., 2005 ; Sjölander et al., 2005; Lövdén et al., 2005 ; EV quartier : Iaria et al., 2009), conformément aux résultats obtenus précédemment en conditions réelles (Bruce, 1983; Kirasic, 1991, 2000 ; Simon et al., 1992).

Concernant les quelques études adressant les modifications neuro-fonctionnelles à l'origine des troubles de la mémoire spatiale et de la navigation dans le vieillissement, toutes soulignent le rôle prépondérant des dysfonctionnements du cortex préfrontal, des structures hippocampiques mais aussi du cortex pariétal postérieur et du cortex rétrospécial (Antonova et al., 2009 ; Moffat, et al ; 2006 ; Moffat et al., 2007, pour revue Moffat, 2009). Pour les auteurs de ces études, ces résultats sont en faveur d'une origine multi-factorielle des troubles de la navigation chez le sujet âgé, impliquant notamment des composants exécutifs, mnésiques et attentionnels. Dans la même veine, nous avons récemment montré à l'aide d'une application simulant un quartier virtuel, que la reproduction en réel, d'un trajet appris en virtuel était altérée chez les âgés (erreurs de directions, temps de décision directionnelle augmenté) et que ces difficultés

²⁵ La piscine de Morris est un labyrinthe classiquement utilisé chez le rongeur pour l'étude la mémoire spatiale. Elle consiste en une piscine remplie d'un liquide opaque dans laquelle l'animal doit trouver une plateforme cachée sous le liquide, en utilisant des indices externes présents dans l'arène (Morris et al., 1982)

étaient corrélés au déclin mnésiques et exécutifs mesurés avec des tâches conventionnelles. Si les performances de navigation chez les sujets jeunes étaient inversement corrélés aux auto-estimations de leurs difficultés quotidiennes à s'orienter et naviguer dans les grands espaces (ie., auto-questionnaires), de manière plus inquiétante cela n'était pas le cas pour les sujets âgés dont les estimations minimisaient les difficultés rencontrées, suggérant des difficultés métacognitives supplémentaires (Taillade et al., 2012).

Notons qu'à coté de ces études très orientées « cognition », d'autres études se sont intéressées au rôle de la composante dite « locomotrice » dans le vieillissement de la cognition spatiale à grande échelle. En effet, par ses interfaces modulables, les outils RV permettent de créer des situations de privation sensorielle et/ou motrice et permettent donc l'étude du rôle sélectif de chaque source de stimulation sensori-motrice. Dans ce contexte les mécanismes sensorimoteurs dits *d'intégration de trajet* ont été étudiés tels que le rôle des processus de traitement du flux optique (Mahmood et al., 2009) ou encore des informations vestibulaires et kinesthésiques (Allen et al. 2004). Et, de manière concluante, il a été montré que les troubles de navigation spatiale avec l'âge trouvaient également une origine dans ces mécanismes au cœur du dialogue cognition-action.

Au final, concernant les effets du vieillissement sur la cognition spatiale, les applications RV ont permis d'une part, de confirmer en situations 3D les études précédentes et, d'autre part d'apporter une cartographie analytique des défaillances cognitives et sensori-motrices qui orchestrent les troubles de la navigation de la personne âgée.

Vieillesse pathologique : *Cognition spatiale à petite échelle* : Des troubles sont rapportées chez les patients MCI et DTA (Henderson et al., 1989 ; voir Cronin-Golomb & Amick, 2001, pour revue) avec notamment des déficits concernant l'exploration spatiale (Previc, 1998), la détection du mouvement (O'Brien et al, 2001 ; Mapstone, et al., 2008), et de la rotation de figures (Kaskie & Storandt, 1995; Armstron & Cloud, 1998 ; O'Brien et al., 2001 ; Rainville et al., 2002). Actuellement, à notre connaissance, aucun équivalent à ces tests n'a été développé en RV pour l'étude de ces mécanismes dans la DTA. D'une manière encore plus surprenante, très peu d'études ont été réalisées dans la MP où préfigurent les troubles visuo-spatiaux dans le tableau clinique. La MP entraîne en effet un déficit des fonctions visuelles (Uc et al. 2005 ; Davidsdottir et al. 2005), des aptitudes spatiales à petite échelle (Cronin-Golomb & Amick, 2001 ; Davidsdottir et al., 2008 ; Lee et al., 1998 ; Amick et al., 2006 ; Cronin-Golomb & Braun, 1997) et un défaut d'intégration des informations visuelles et proprioceptives pour le contrôle du mouvement (Adamovich et al., 2001).

Ces altérations visuo-spatiales dans la MP ont été retrouvées dans un étude en RV qui proposait des tâches nécessitant la manipulation d'objets (Virtual Tray of Objects Task) (Stirke & Foreman, 2005). Malheureusement, dans cette étude, les résultats n'ont pas été comparés aux tests classiques, ni mis en relation avec des évaluations portant sur les difficultés quotidiennes ou la sévérité de la maladie, en conséquence toute conclusion sur la validité de ces nouveaux outils RV reste hasardeuse.

Au total, les aptitudes spatiales à petite échelle dans la DTA ou la MP restent à être explorés dans les dispositifs RV.

Cognition spatiale à grande échelle : Les capacités à grande échelle ont, quant à elles, fait l'objet d'un plus grand nombre d'études. La DTA est associée à une désorientation spatiale et des comportements d'errance pouvant apparaître à des stades précoces (Henderson et al., 1989 ; Ballard et al., 1991; Passini et al., 1995; Pai & Jacobs , 2004 ; Algase et al., 2004), qui sont eux-mêmes facteurs de risque d'accidents et souvent à l'origine du placement en institution (McShane et al., 1998 ; Rowe, 2003). Certains auteurs avancent même que l'altération des

performances d'apprentissage spatial et de navigation dans des grands espaces constitueraient en soi des marqueurs d'une évolution vers la démence (Moffat, 2009 ; Laczó et al. 2009).

Les études réalisées en réel, reproduisant le test de la piscine de Morris (Hort et al., 2007 ; Laczó et al., 2009) ou des environnements plus écologiques d'apprentissage spatial (Cherrier et al., 2001 ; Kalova et al., 2005 ; Kessels et al., 2005 ; Monacelli et al., 2003) rapportent toutes une baisse significative des performances chez les patients MCI, baisse encore plus importante chez les DTA.

La mise en lien des mesures d'atrophie cérébrale des patients et des performances d'apprentissage spatial et de navigation en condition réelle à permis de montrer que chez des patients présentant un MCI ou une DTA, l'intégrité de l'hippocampe et du lobule intra-pariétal droit prédisait les performances de mémoire spatiale en réel de ces personnes, contrairement aux tests psychométriques classiques (DeIpolyi et al., 2007). Les mesures écologiques d'apprentissage spatial chez les personnes âgées seraient donc de bons marqueurs précoces des troubles cognitifs et des lésions neurologiques associés à la DTA. Concernant les études en RV, Tippett et al. (2009) ont évalué les performances de mémoire de route et de contrôle des mouvements dans un quartier virtuel chez des sujets MCI et des sujets âgés. Ils ont mis leurs résultats en relation avec des tests classiques de mémoire à court terme, de mémoire visuelle et du fonctionnement exécutif, avec pour résultat une bonne corrélation de leur indices en RV avec les tests classiques mais sans discrimination possible entre les personnes MCI et contrôles. Ce dernier résultat est expliqué par les auteurs comme résultant probablement d'un manque de précision des mesures, d'un faible niveau de complexité du parcours, et d'une corrélation trop importante avec les tests classiques révélant leur faible valeur de dépistage.

A l'inverse, et de manière convaincante, Cushman et al. (2008) ont réalisé une étude en RV dont les résultats témoignaient de la pertinence des mesures en RV pour discriminer différents groupes de sujets (jeunes, âgés, MCI et DTA dans cette étude). Sur la base d'une tâche d'apprentissage et de navigation dans une réplique RV d'un hôpital, des patients (MCI et DTA) étaient bien distingués du groupe contrôle par les tâches de positionnement de photos, et de rappel libre de repère ou d'objets présents sur le parcours, tout comme dans la version réelle du test de navigation. Ceci confère à la tâche RV utilisée une excellente validité écologique tout en confirmant sa possible utilisation dans le diagnostic précoce de la démence [85% des personnes pouvaient être classées correctement (saines vs. pathologiques) par ce test]. Ces résultats, de manière générale, viennent étayer ceux déjà obtenus montrant des difficultés de mémoire spatiale et de navigation, en situations réelles de conduite (O'Brien et al., 2001 ; Uc et al., 2004) ou de locomotion (eg. Passini et al., 1995, 2000 ; Cherrier et al., 2001 ; Rainville et al., 2001, Monacelli et al., 2003 ; Kavcic et al., 2006 ; DeIpolyi et al., 2007 ; O'Brien et al., 2001 ; Mapstone et al., 2008).

La région médiotemporale, dont le rôle est connu comme critique dans la construction des représentations spatiales configurationnelles (Burgess, 2008), constitue la cible la plus précoce des lésions caractéristiques de la DTA (Blennow et coll., 2006). L'étude des liens entre ce support anatomique et les performances des sujets constitue donc une voie d'investigation privilégiée dans le cadre du diagnostic précoce de la maladie (voir Hort, et al., 2007 ; Laczó et al., 2009 ; 2010 ; 2011).

Ainsi, Weniger et al. (2011) ont développé des tests de mémoire spatiale et de navigation dans des EV avec l'objectif de mettre en relation les résultats obtenus en RV par des patients MCI et DTA avec, d'une part, une analyse du volume de différentes régions cérébrales (hippocampe, cortex pariétal, précuneus, striatum, globus pallidus) et d'autre part, avec des mesures psychométriques classiques (mémoire visuelle, fonctionnement exécutif, attention, mémoire à court terme, mémoire de travail...). Dans leur étude, deux EV étaient utilisés: le premier appelé « Virtual Park », constitué d'un EV ouvert avec des repères visuels permettant une stratégie de navigation « configurationnelle ou allocentrique » et, le second, le « Virtual Maze » composé

de couloirs sans repères nécessitant l'emploi d'une stratégie de navigation « égocentrique ». Dans chaque environnement, les sujets avaient cinq essais pour atteindre une cible (non visible sans navigation). Les patients MCI ont obtenu des performances inférieures aux sujets contrôles dans les deux types d'environnement. Ils présentaient une réduction bilatérale hippocampique, une diminution du précuneus droit et des cortex pariétaux inférieurs. Les erreurs dans le « Virtual Maze » étaient corrélées au volume du précuneus droit et aux lésions striatales ce qui n'était pas le cas pour les performances dans le « Virtual Park ». Cependant, les mesures de navigation en RV n'ont pas pu différencier les MCI ayant convertis en DTA (sur un suivi longitudinal de six ans) des autres patients. Les auteurs concluent donc sur le potentiel des études RV et encouragent le développement de mesures plus sensibles encore pour pouvoir prédire l'évolution du statut cognitif des MCI (voir également, Weniger et al., 2010).

Ces premiers résultats sont prometteurs et mettent à jour le potentiel des applications RV, que ce soit pour la description des mécanismes à l'origine de la désorientation ou le diagnostic précoce de la DTA.

Du côté de la MP, les études portant sur les difficultés de mémoire spatiale ou de navigation dans des grands espaces sont encore plus rares pour le moment, que ce soit en situation réelle ou en laboratoire. Néanmoins, on trouve l'étude de Lepow et al. (2002) qui propose une évaluation des capacités de mémoire spatiale à l'aide d'un labyrinthe reprenant les caractéristiques de la piscine de Morris et d'un labyrinthe radiaire. Le but était de retrouver cinq positions parmi un ensemble de vingt dans une arène circulaire présentant des indices proximaux et distaux. Deux conditions de configurations du point de départ et d'indices proximaux ont été utilisées, permettant de déterminer la stratégie utilisée par les participants (configurationnelle vs. égocentrique). Les patients parkinsoniens étaient plus sensibles à la suppression des indices proximaux et moins aptes à adopter la stratégie la plus efficace. Cette tâche RV étant à la fois dépendante de la mémoire spatiale, et des capacités de flexibilité (ie., nécessité de changement de stratégie selon le point de départ et les indices en présence), les auteurs n'ont pu conclure sur le type de mémoire spatiale (configurationnelle vs. égocentrique) affectée dans la MP. Notons, par contre, que Montgomery et al. (1993) ont étudié les capacités d'intégration de trajet grâce à des tâches analogues à la tâche de complétion de triangle chez des patients MP. Six parcours construits sur une grille de 6*6 m étaient proposés, avec 1 ou 2 changements de directions et différents angles de rotation aux intersections. Le but était d'estimer la direction du point de départ du trajet à la fin du parcours. Dans une première condition, les participants étaient déplacés sur une chaise roulante, avec une boîte sur la tête, leur cachant les repères présents au sol et leur fournissant surtout des informations visuelles (flux optique) et vestibulaires (également proprioceptive selon les auteurs). Dans une seconde condition, les sujets étaient déplacés sur une chaise roulante avec les yeux bandés, leur fournissant uniquement des informations vestibulaires (et proprioceptives). Les patients MP ont obtenu des performances inférieures pour la condition fournissant des informations vestibulaires et visuelles mais pas pour celle ne fournissant que des informations vestibulaires. Les auteurs ont conclu à des difficultés de mise à jour de leur orientation lorsque des informations relatives au flux optique sont absentes, pouvant expliquer en partie les difficultés de navigation rencontrées chez certains parkinsoniens. Pour l'heure, aucune investigation en RV n'a été réalisée malgré les possibilités qu'offre cette technologie à renseigner les mécanismes d'intégration de trajet.

Ainsi, les études sur la cognition spatiale utilisant la RV souffrent encore aujourd'hui de ne pas mettre systématiquement en relation les performances en RV avec, d'une part, les performances issues de versions réelles des tests, et d'autre part, avec les mesures des échelles de diagnostic de la démence et d'évaluation du handicap spatial au quotidien compromettant ainsi la démonstration de la valeur ajoutée de ces outils (Algase et al., 2007; Chiu et al., 2005). Malgré cela, la RV et son couplage avec les techniques de neuroimagerie dans le domaine de la

cognition spatiale, a permis des avancées significatives dans la compréhension des mécanismes à l'origine des troubles de la navigation et de l'apprentissage (encodage, récupération des connaissances spatiales, planification, mise à jour...) dans les grands espaces dans le cas du vieillissement normal et pathologique. Elle a également permis de questionner l'utilisation de tests de mémoire spatiale comme outils de diagnostic précoce de la DTA (voir, Moffat, 2009, pour revue).

MEMOIRE EPISODIQUE

La mémoire épisodique correspond à la mémoire des événements indexés spatio-temporellement (Tulving, 2002). Parmi les tests classiquement utilisés pour l'évaluer, on peut citer le «California Verbal Learning Test» (CVLT ; Delis et al., 1987), le «Wechsler Memory Scale-Revised» (WMS-R ; Wechsler, 1987) ; ou encore le Grober & Buschke (1987). Il s'agit de tests utilisant du matériel verbal qui sont d'une part, éloignés de la définition et donc du concept de mémoire épisodique, et d'autre part, peu écologiques et donc faiblement corrélés aux évaluations de la mémoire « au quotidien » (Sunderland et al., 1983). Afin de compenser ses lacunes, plusieurs approches ont été envisagées, comme l'observation directe, des questionnaires (eg. le QAM, Van Der Linden et al., 1989), des épreuves neuropsychologiques avec mise en situation (Helmstaedter et al., 1998) où les patients sont testés sur leur capacité à rappeler des détails de faits se rapportant aux tests passés la semaine précédente, ou encore des simulations comme le « Rivermead Behavioral Memory Test » (RBMT, Wilson et al., 1993). Différentes évaluations portant plus sur la composante spatiale de la mémoire épisodique ont été également développées comme par exemple le « Misplaced Objects Test » (Crook et al., 1990), qui est un test informatisé de mémoire pour la position d'objets dans une maison de sept pièces ; voir également le « Spatial Location Memory Test » (Sanchez et al., 1997), le « Spatial Array Memory Test » (SAMT, Meador et al., 1990) ou la « Room Task » (Kessels et al., 2005).

Vieillesse normale : Les difficultés de mémoire épisodique sont couramment rencontrées chez la personne âgée qu'il s'agisse d'activités mettant en jeu les aspects rétrospectifs (Jones & Jacoby, 2005 ; Bernard et al., 2007 ; Head et al., 2008) ou prospectifs²⁶ (Henry et al., 2004 ; Kliegel et al., 2008 ; McDaniel et al., 2008, pour revue) de cette mémoire. S'il existe des études chez les sujets jeunes ou cérébro-lésés (eg. Brooks et al., 2002), aucune étude à notre connaissance n'a étudié la mémoire prospective chez les personnes âgées en utilisant la RV. Concernant la mémoire rétrospective, il existe actuellement très peu d'études portant sur les applications en RV et le vieillissement normal ou pathologique. Cet état de chose vient probablement de la difficulté à simuler une activité mettant en jeu la mémoire épisodique dans toute sa complexité (un événement, un contexte spatial, temporel, des détails), aussi la plupart des travaux concerne l'unique composante spatiale de la mémoire épisodique et sera considérée comme relevant de mesures de navigation ou de mémoire purement spatiale.

Dans le souci de correspondre à la définition de la mémoire épisodique, Plancher et al. (2008 ; 2010) ont étudié l'effet du vieillissement sur les performances d'apprentissage d'événements et d'objets le long d'un trajet dans une ville virtuelle. Différents tests ont été utilisés afin d'évaluer les composantes de la mémoire épisodique (quoi, où, quand, détails et un test de reconnaissance). Deux types d'encodage ont été effectués (incident et intentionnel) ainsi que deux modes d'interaction (actif vs passif). Leurs résultats principaux sont, un effet du

²⁶ La mémoire prospective a été définie comme la mémoire des actions futures à réaliser (basée sur différents indices : un événement, le temps (après un certain intervalle de temps ou une heure fixe), ou une action (Kvavilashvili & Ellis, 1996) et est fortement impliquée dans toutes les AVQ (Schmitter-Edgecombe et al., 2009).

vieillessement plus important sur la mémoire du contexte et des détails et un encodage intentionnel moins efficace chez les personnes âgées. Cette étude confirme donc la critique diminution des performances de mémoire épisodique dans le vieillissement, en particulier lorsque l'encodage est explicite. De plus la possibilité, avec la RV d'enrichir la tâche expérimentale en adjoignant aux faits un contexte spatio-temporel ainsi que des détails a permis de démontrer que ces aspect négligés dans les tests classiques sont les plus touchés dans le vieillissement. La RV permet donc de tester les concepts théoriques de manière plus précise mettant à jour une évaluation psychométrique parfois « trop granulaire » avec les tests traditionnels.

Vieillessement pathologique : Concernant le vieillissement pathologique, plusieurs études (Zakzanis et al. 2009 ; Widmann et al., 2010) ont transféré en RV le paradigme d'apprentissage répétés utilisé classiquement dans le CVLT, mais à notre connaissance une seule exploite les données en terme de mémoire épisodique (Widmann et al., 2010). Ainsi, dans cette étude les performances de mémoire épisodique de deux groupes de personnes (âgées vs. DTA précoce) sont évaluées dans un quartier virtuel dans lequel les personnes devaient mémoriser un trajet et les enseignes de certains magasins. Différents indices de mémorisation étaient alors utilisés : apprentissage (évolution du rappel entre les différents essais), rappel libre des noms des magasins, dessin de la route, positionnement de photos de magasins rencontrés sur le trajet, reconnaissance de photos de magasins et une tâche de dénomination des magasins. Les performances à ces tests ont été mises en relation notamment avec les performances des sujets au test classique de mémoire verbale CVLT de manière à évaluer la valeur ajoutée d'une évaluation dans un environnement plus naturel. Pour le groupe des personnes âgées contrôles, les résultats ont montré une correspondance quasi parfaite entre les résultats (rappel libre) au CVLT et les résultats au test RV. En revanche, pour le groupe de DTA, les performances de rappel étaient plus faibles avec le test RV (20% des items rappelés) qu'avec la CVLT (40%). Les auteurs concluent que le paradigme d'apprentissage de liste de mots (CVLT classique) sous-estime les capacités de mémoire au quotidien. De plus, alors que les performances sur les tests de reconnaissance (CVLT vs. RV) sont équivalentes pour le groupe des personnes âgées, les performances sont meilleures en RV comparativement à la CVLT pour les patients DTA. Ainsi la RV renforce la différence entre les performances de rappel libre et de reconnaissance chez les DTA. Une évaluation de la mémoire épisodique avec un EV-3D s'avère donc un meilleur descripteur (moins de faux positifs et négatifs) des déficits dans la DTA ce qui en fait un bon candidat comme outil de diagnostic précoce de cette maladie.

Plancher et al. (2012) ont récemment utilisé le même protocole que décrit précédemment (dans l'étude du vieillissement normal) pour caractériser les profils de déficits associés au MCI et à la DTA. Dans cette étude, trois groupes de sujets (âgés contrôles, MCI, DTA) ont donc navigué dans un EV, soit de manière passive soit active (ie. passager vs. conducteur d'un véhicule) puis ont répondu à des questions relatives au trajet parcouru et relevant de toutes les composantes de la mémoire épisodique (quoi, ou, quand, détails et binding d'un événement). Comme attendu, les DTA étaient déficitaires sur la plupart des mesures et les MCI présentaient des performances intermédiaires entre les sujets âgés et DTA. Les mesures portant sur les informations spatiales de nature allocentrique se sont révélées les plus discriminantes entre les groupes pathologiques et le groupe contrôle, confirmant la valeur de ce marqueur comportemental pour le diagnostic de la DTA. Les auteurs rapportent également un effet bénéfique de l'encodage actif pour les populations pathologiques qu'ils mettent en lien avec la préservation de la mémoire procédurale. Aussi, les conditions d'apprentissage dynamique, multisensoriel, proches du réel permettaient aux mesures en RV de mieux prédire les difficultés des personnes au quotidien que ne le font les évaluations papier-crayon standards.

Ces résultats plus que convaincants, démontrent qu'un contexte de testing écologique peut être tout aussi, sinon plus, sensible que les évaluations traditionnelles tout en fournissant des mesures plus corrélées au handicap des sujets.

FONCTIONS EXECUTIVES

Elles sont définies comme les processus qui contrôlent et régulent les activités cognitives, et notamment l'exécution de comportements finalisés dans les situations complexes et nouvelles (Lezak, 2004). Il existe de nombreux tests traditionnels sensibles au syndrome dysexécutif, parmi lesquels, les tests de fluence verbale et le Trail Making Test partie B (Reitan, 1992) mesurant la flexibilité mentale ; la tour de Londres (Shallice, 1988) et ses variantes (tour de Hanoi, tour de Toronto) ou encore le labyrinthe de Porteus (Porteus, 1950) s'adressant aux capacités de planification et de résolution de problème spatiaux; le Wisconsin Card Sorting Test est quant à lui multi-déterminé (Heaton et al., 1993).

Mais les fonctions exécutives étant avant tout des fonctions *in situ*, ancrées dans l'action, les tests traditionnels démontrent une pauvre validité écologique (Shallice & Burgess, 1991 ; Manchester et al., 2004 ; Spooner & Pachana, 2006 ; Burgess et al., 2006). Aussi la littérature témoigne abondamment de l'« incomplétude » des évaluations papier-crayon dont les résultats reflètent que très peu les difficultés quotidiennes des personnes souffrant d'un syndrome dysexécutif (pour revue Chevignard et al. 2006). Ainsi, étant donné le lien direct entre les AVQ et les fonctions exécutives, l'intérêt de l'approche écologique dans l'étude du vieillissement cognitif normal et pathologique est d'une importance capitale pour la pratique clinique (Willis et al., 1998).

Vieillesse normale : L'hypothèse fronto-exécutive du vieillissement propose que le déclin cognitif lié à l'âge puisse s'expliquer en grande partie par celui des fonctions exécutives (eg. West et al. 1996 ; Gershberg & Shimamura, 1995 ; Taconat, et al. 2007). Il est clairement établi que les performances exécutives des âgés déclinent avant 65 ans (Daigneault et al., 1992) et sont inférieures à celles des jeunes adultes sur la résolution de problème (Mata et al., 2007 ; Zamarian et al., 2008), la flexibilité cognitive (Troyer, et al. 1997 ; Henri & Philips, 2006), l'inhibition (Spieler, et al. 1996 ; Hamilton & Martin, 2005) ou encore la planification (Andrès & Van der Linden, 2000 ; Zook, et al. 2006). Récemment, les scores obtenus par les personnes âgées aux tests exécutifs ont également été corrélés de manière significative au volume cortical préfrontal (Raz et al., 2000 ; Gunning-Dixon & Raz, 2003 ; Elderkin-Thompson et al., 2008) dont l'atrophie est à la fois précoce dans le vieillissement (De Carli, 2005) et plus importante que celle d'autres régions corticales (Raz, 1997 ; pour une revue, voir Raz, 2000 ; Raz et al. 2005).

La RV a déjà été appliquée à l'évaluation des fonctions exécutives en construisant d'une part, des répliques 3D de tests papier-crayon traditionnels (le WCST, Elkind et al., 2001; version 3D de la tour de Londres, Young et al., 2007) et, d'autre part, en simulant des AVQ comme les tâches de conduites automobiles (Liu et al., 1999a), des tâches de commission (LoPriore et al., 2004 ; McGeorge et al., 2001, Law et al. 2006, Rand et al., 2009) ou de cuisine (Christiansen et al., 1998; Zhang et al., 2003). Cependant, ces études portaient essentiellement sur des échantillons de jeunes adultes, de personnes avec traumatismes crâniens ou troubles psychiatriques. Les travaux concernant le vieillissement normal ou pathologique, très peu nombreux, révèlent des effets de l'âge souvent majorés (Craick & Bialystock, 2006) ou équivalents à ceux obtenus dans les tâches de laboratoires traditionnelles (Messier et al, 2007). Généralement, est rapporté un pattern de déficits comprenant l'augmentation des erreurs de planification et de persévération, la réduction de la vitesse de traitement ainsi que la présence de déficits attentionnels. Bien que l'étude de Craik et Bialystock (2006) n'utilisait pas un

dispositif RV immersif, elle mérite d'être citée puisque qu'elle mesurait les performances des âgées dans une situation multi-tâches informatisée, situation mettant en jeu de nombreux processus cognitifs comme dans la vie réelle. Craik et Bialystock demandaient aux sujets jeunes et âgés de commencer, puis d'arrêter de cuisiner le petit déjeuner et de mettre autant de couverts que possibles entre-temps. Les auteurs faisaient varier la difficulté de la tâche (de 1 à 5 écrans) en augmentant le nombre d'écrans nécessaires pour cuisiner. Par exemple, dans la condition 1 écran, la table et les aliments à cuisiner étaient vus ensemble tandis que dans la condition 2 écrans, ils étaient vus séparément, ce qui obligeait les sujets à alterner entre la tâche distractive (mettre les couverts) et la tâche cible (préparer le petit déjeuner). Les performances des âgés restaient correctes lorsque le niveau de difficulté était bas, mais déclinaient au fur et à mesure que la tâche se complexifiait. Lorsque la tâche nécessitait plus de ressources de traitement et la gestion de plus de tâches simultanément alors les âgés mettaient plus de temps à préparer la table mais commettaient également plus d'erreurs de persévérations ou d'oublis dus à une incapacité à alterner entre deux tâches. D'autres résultats sur des protocoles expérimentaux écologiques mobilisant fortement les processus stratégiques comme faire les courses (Sjölander et al., 2005), s'injecter de l'insuline au moment approprié ou organiser une soirée entre collègues de bureau (Guimond et al., 2006) ont également confirmé une baisse des performances associée au vieillissement. Ces études en RV montrent qu'il est désormais possible de simuler des AVQ quasi *in situ* et démontrent l'origine dysexecutive des difficultés qu'éprouvent les âgés pour effectuer ces dernières. Notons de plus, que la majoration des effets de l'âge par les dispositifs RV suggère que les tests classiques sous-estiment les répercussions dysexecutives des âgés dans la vie réelle.

Vieillesse pathologique : Les troubles du fonctionnement exécutif font partie du tableau clinique de la DTA (Parasuraman & Nestor, 1991), et concerneraient : l'inhibition (Amieva et al., 2004 ; Colette et al., 2007 ; voir Fournet et al., 2007 pour revue), la planification (Rainville et al., 2002 ; Franchesi et al., 2007 ; Woo et al., 2010), et la flexibilité (Grady et al. , 1988). Ces altérations sont également retrouvées lors de situations de testing plus écologiques comme les tâches de navigation dans un labyrinthe (Grosse et al. 1991) ou des tâches de conduites automobile réelles (Grace et al., 2005). Cette symptomatologie exécutive se manifeste dès les premiers stades de la maladie. Ainsi, peut-on, par exemple observer de moindres performances exécutives chez les personnes DTA au stade léger comparées aux âgés contrôles (Lafèche et Albert, 1995 ; Reid et al., 1996). Selon Woo et al., (2010) l'hypométabolisme des régions préfrontales -mais aussi pariétales et occipitales- expliquerait la détérioration précoce des fonctions exécutives dans cette démence.

Dans une perspective d'évaluation écologique en RV, Hofmann et al. (2003), ont utilisé la tâche de commission simulée dans une rue commerçante virtuelle et rapportent que comparés aux sujets âgés contrôles, les patients DTA présentent un allongement du temps de la réalisation de la tâche ainsi que des oublis et persévérations lors de la première exposition à la tâche. De plus cet allongement du temps de réalisation est fortement corrélé à l'indicateur de vitesse de traitement du Trial Making test. L'activité de commissions a également été interrogée par Werner et al. (2008) dans un supermarché virtuel. Ces auteurs ont pu mettre en évidence l'efficacité du dispositif RV d'évaluation des fonctions exécutives pour discriminer les patients MCI des contrôles. Les patients MCI mettaient plus de temps que les contrôles, à faire les courses, prenaient de plus longues pauses et leur trajet était plus long en terme de distance parcourue. Ces résultats confortent la valeur clinique des IADL dont la mesure permet de dépister des troubles cognitifs mêmes légers avant l'installation d'une démence.

A sévérité égale entre la DTA et la MP, l'atteinte des fonctions exécutives est généralement plus importante dans la MP (Litvan et al., 1991) et constitue souvent un signe inaugural de cette démence (Owen et al., 1992 ; Cronin-Golomb, et al. 1994 ; Altgassen et al., 2007 ; Levy et al.,

2002). C'est en effet, l'atteinte précoce du circuit fronto-striatal (Lewis et al., 2003 ; Lozza et al., 2004 ; Dirnberger, et al. 2005) qui est identifié comme responsable de ces troubles dysexécutifs. Le rôle de ces déficits dans les AVQ a été étudié à l'aide d'une tâche simulée de commission dans un supermarché virtuel. Les patients MP parvenaient à réussir l'activité sans commettre plus d'erreurs que les personnes âgées contrôles mais présentaient en revanche un ralentissement dans l'exécution de la tâche et de nombreuses hésitations pour atteindre les produits, révélant un trouble dysexécutif sélectif de planification (Klinger et al., 2006). Ces effets de la MP sont également observés dans l'étude de Messier et al. (2007) où les performances d'apprentissage détériorées des patients sont majorées avec l'augmentation de la demande de coordination sensori-motrice lors de la tâche.

En 2002, Albani et al. simulent quant à eux, avec une autre application RV les activités de préparation d'un repas et de toilette. Les difficultés des patients MP pour ces activités reflètent leurs difficultés à planifier et ordonner correctement des séquences motrices nécessaires à la réalisation d'activités complexes. Stolwyk (2006) ont étudié la situation de conduite (avec ou sans tâche distractive) en RV chez un groupe de patients MP et d'âgés contrôles. Un effet négatif de la tâche distractive est rapporté pour les deux groupes de sujets. Par ailleurs, les performances de conduites en termes de mesures de freinage, de décélération, ou de temps de réaction étaient complètement effondrées chez les patients MP comparés aux sujets contrôles. Ainsi, l'atteinte des fonctions exécutives (flexibilité et inhibition en particulier) est capable d'interférer et perturber la réalisation de la tâche de conduite où pourtant la coordination visuo-motrice relève en partie de processus automatiques chez les conducteurs expérimentés. Les déficits observés chez les patients suggèrent que : soit, conscients de leur handicap, ils conduisent plus prudemment, donc de manière moins procédurale, et se retrouvent en situation de double tâche les empêchant d'allouer les ressources de traitement de manière appropriée à chacune des deux tâches (Scally et al., 2011 ; Stolwyk et al., 2005), soit que le niveau d'automatisme de la conduite est bien maintenue mais quand l'attention est focalisée sur la tâche concurrente, leur manque de flexibilité les empêche de passer de la tâche concurrente vers la conduite (et inversement, et ce autant de fois qu'il est nécessaire de le faire), expliquant alors les erreurs de conduites (Uc et al., 2006).

Dans tous les cas, les études en RV rapportent une majoration du déclin exécutif associé au vieillissement normal et pathologique soulignant que les évaluations classiques ne permettent pas de prendre la pleine mesure de ces difficultés dans le quotidien des personnes. Les applications RV permettent d'étudier l'orchestration complexe des fonctions exécutives telles qu'elles se déploient au quotidien. Une telle démarche assure en retour, une meilleure compréhension du déclin exécutif dans le vieillissement, la DTA et la MP en termes de répercussions ou incapacités fonctionnelles.

CONCLUSION

L'émergence des applications neuropsychologiques de la RV a permis comme nous venons de le voir, d'enrichir l'étude du vieillissement cognitif d'une approche plus écologique posant la question des différences entre cognition évaluée en laboratoire et cognition quotidienne. En effet, la RV permet de dépasser les limites présentées par les tests neuropsychologiques traditionnels et les questionnaires d'auto-évaluation des difficultés cognitives, en combinant les qualités psychométriques des premiers avec la validité écologique des seconds.

La revue de la littérature indique premièrement que les applications de RV permettent dans l'ensemble de reproduire les patterns de performances associés au vieillissement normal et pathologique. Lorsque les résultats divergent, il semblerait que les mesures écologiques fournies par la RV tentent toujours à majorer les troubles par rapport au testing traditionnel. Ainsi, lors de situations dynamiques, plus proches du quotidien, les personnes âgées

manifestent plus de difficultés que lors d'évaluation papier-crayon indiquant que ces derniers minimisent les difficultés rencontrées réellement dans la vie courante. Cette interprétation est cohérente avec plusieurs études rapportant des corrélations significatives entre les difficultés cognitives au quotidien rapportées par les sujets et la RV (contrairement aux évaluations classiques) (eg. Plancher et al. 2012). Ceci, explique probablement que les mesures en RV proches du handicap réel soient sensibles à la détection d'une démence et puissent différencier les populations saines des populations pathologiques (eg. Widman et al., 2010 ; Severson et al., 2007 ; Cushman et al. 2008). Pris ensemble, ces résultats attestent du statut de *la cognition quotidienne* comme champ de recherche à part entière où la RV, comme outil d'investigation, tiendra une place critique par le contrôle expérimental et la fiabilité des observations qu'elle permet. Les études à venir revisiteront certainement, sous une perspective située, les données et faits expérimentaux acquis en laboratoire concernant le vieillissement normal et pathologique. Cette perspective est d'autant plus prometteuse qu'il est aujourd'hui possible de coupler la RV avec les techniques d'imagerie (Graham et al. 2003 ; Baumann et al. 2003). Ce couplage permet déjà aujourd'hui de repenser la contribution des territoires cérébraux durant les activités cognitives. A titre d'exemple, certaines activités complexes comme la navigation ne pouvaient pas, jusque là, être étudiées à la lumière de l'imagerie car les équipements lourds et non mobiles ne sont pas compatibles avec cette activité complexe et nécessairement en mouvement dans de grands espaces (eg. Burgess et al., 2001, King et al., 2005). Aujourd'hui, la RV offre de nouvelles possibilités à ce champ d'étude (Andreano et al., 2009 ; Baumann et al., 2003 ; Carvalho et al. 2006 ; Di Bono & Zorzi, 2008 ; Diekmann, et al. 2007 ; Kim et al., 2009 ; Maguire, et al. 1999). A cela, dans une perspective de recherches plus cliniques, il est envisageable que des marqueurs neurocomportementaux de la cognition quotidienne puissent être un élément contributif au diagnostic différentiel des démences au même titre que les examens cliniques d'usage (imagerie, évaluations neuropsychologiques d'usage ainsi que les dosages de marqueurs biologiques de certaines pathologies, ANAES, 2000).

Toutefois, les développements futurs devront tenir compte des limites soulevées par cette revue. Par exemple, la plupart des études ayant optées pour une grande validité écologique au détriment de la spécificité des mesures échouent à démontrer leur capacité à identifier le ou les mécanismes cognitifs sous-tendant les différences entre les groupes (eg., Hoffman et al., 2003 ou Werner et al., 2008). Disposer de mesures fines des processus en jeu lors d'une tâche est une garantie de progrès dans la compréhension des mécanismes de la cognition quotidienne (McGee et al., 2000 ; Schultheis et al., 2002 ; N'Kaoua & Sauzéon, 2008). De la même manière, l'étude des liens entre performance en RV, scores aux échelles du handicap, et mesures de sévérité des troubles cognitifs (e.g., MMSE, CVLT, TMT...), n'est pas réalisée de manière systématique rendant la valeur ajoutée de ces nouveaux outils quelque peu opaque.

Enfin, dans une perspective d'application clinique, un des enjeux des outils futurs (d'évaluation ou de remédiation) concerne la portabilité de ces derniers. Il s'agit de favoriser le développement d'outils minimalistes, portables et faciles d'utilisation par les cliniciens. Pour ce faire, dès aujourd'hui les études de validation doivent s'inscrire dans ce type d'équipements afin de raccourcir des délais entre les phases de recherche/validation et de mise en service. Il apparaît indispensable que les recherches s'appuient sur des systèmes RV dont le format est à un niveau « pré-industriel » avec une attention particulière sur la portée des IHM utilisées qui sont loin d'être sans effet sur les traitements cognitifs et sensorimoteurs réalisés par les sujets (eg. Larrue et al. 2009 ; Ruddle & Lessels, 2009 ; Cockburn & McKenzie, 2004).

References

- Adamovich, S.V., Berkinblit, M.B., Hening, W., Sage, J., Poizner, H. (2001). The interaction of visual and proprioceptive inputs in pointing to actual and remembered targets in Parkinson's disease. *Neuroscience* 104 (4), pp. 1027-1041.
- Agence Nationale d'Accréditation et d'Évaluation en Santé. Recommandations pratiques pour le diagnostic de la maladie d'alzheimer. Service des recommandations et références professionnelles, <http://www.anaes.fr> ou <http://www.sante.fr>, 2000.
- Albani, G., Pignatti, R., Bertella, L., Priano, L., Semenza, C., Molinari, E., Riva, G., Mauro, Common daily activities in the virtual environment: A preliminary study in parkinsonian patients. *Neurological Sciences*, 2002, 23(2), 49-50.
- Algase, D. L., Beattie, E. R. A., Song, J. -A., Milke, D., Duffield, C., Cowan, B. (2004). Validation of the Algase Wandering Scale (Version 2) in a cross cultural sample. *Aging and Mental Health*, 8 (2), pp. 133-142.
- Algase, D., Son, G.R, Beel-Bates, C., Song, J., Tao, L., Beattie., E.,Leitsch, S., (2007). Initial psychometric evaluation of the wayfinding effectiveness scale. *Western Journal of nursing research*, 29(8), 1015-1032.
- Allen, G.L., Kirasic, K.C., Rashotte, M.A., Haun, D.B.M. (2004). Aging and path integration skill: Kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Perception and Psychophysics*, 66 (1), pp. 170-179.
- Altgassen, M., Phillips, L.,Kopp, U., Kliegel, M. (2007). Role of working memory components in planning performance of individuals with Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 45 (10), pp. 2393-2397.
- American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, fourth ed. DSM-IV*. American Psychiatric Association, Washington, DC, 1994.
- Amick, M. M., Schendan, H.E., Ganis, G., & Cronin-Golomb, A. (2006). Frontostriatal circuits are necessary for visuomotor transformation: Mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 44 (3), 339-349.
- Amieva, H., Phillips, L. H., Della Sala, S., Henry, J. D. (2004). Inhibitory functioning in Alzheimer's disease. *Brain*, 127, pp. 949-964.
- Andreano, J., Liang, K.,Kong, L., Hubbard, D.,Wiederhold, B.K.,Wiederhold, M.D. (2009). Auditory cues increase the hippocampal response to unimodal virtual reality. *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 12 (3), pp. 309-313
- Andrés, P., & Van der Linden, M. (2000). Age related differences in Supervisory Attentional System functions. *Journal of Gerontology : Psychological Sciences*, 35, pp. 373-380.
- Andrés, P., Parmentier, F.B.R., Escera, C. (2006). The effect of age on involuntary capture of attention by irrelevant sounds: A test of the frontal hypothesis of aging. *Neuropsychologia* 44 (12), pp. 2564-2568.
- Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D., & Morris, R. G. (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17 (2), pp. 125-143.
- Arbuckle, T.Y., Cooney, R.,Milne, J., Melchior, A. (1994). Memory for spatial layouts in relation to age and schema typicality. *Psychology and Aging* 9 (3), pp. 467-480
- Armstrong, C. L., & Cloud, B. (1998). The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal aging. *Neuropsychology*, 12 (2), pp. 208-217
- Arns, L.L., Cerny, M.M. The Relationship Between Age and Incidence of Cybersickness among Immersive Environment Users. *Proceedings of the 2005 IEEE Conference 2005 on Virtual Reality*, 2005, 267-268.
- Baguena, N., Thomas-Antérion, C., Scieessere, K.,Truche, A., Extier, C., Guyot, E., Paris, N. (2006). Ecologic evaluation in the cognitive assessment of brain injury patients: generation and execution of script. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 49 (5), pp. 234-241
- Ball, K., Owsley, C., Sloane M. E., Roenker, D. L., Bruni, J., R. (1993). Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 34, pp. 3110-3112.

- Ballard C. G., Mohan R. N., Handy C. B. , & Patel A. (1991). Wandering in dementia sufferers. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 6 (8), pp. 611-614.
- Barberger-Gateau, P., Fabrigoule, C., Helmer, C., Rouch, I., Dartigues, J.F. Functional impairment in instrumental activities of daily living: An early clinical sign of dementia? *Journal of the American Geriatrics Society*, 1999, 47(4), 456-462
- Barberger-Gateau, P., Letenneur, L., Pérès, K. Résultats Paquid, from http://www.isped.ubordeaux2.fr_RECHERCHE_paquid_2004_Resultats_PAQUID, 2004.
- Barrash J. (1994). Age-related decline in route learning ability. *Developmental Neuropsychology*, 10, pp.189-201
- Baumann, S., Neff, C., Fetzick, S., Stangl, G., Basler, L., Vereneck, R., Schneider, W. A Virtual Reality System for Neurobehavioral and Functional MRI Studies *CyberPsychology & Behavior*, 2003, 6(3), 259-266.
- Berardi, A., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2001). Overall vigilance and sustained attention decrements in healthy aging. *Experimental Aging Research*, 27, pp. 19 – 39.
- Bernard, F. A., Desgranges, B., Eustache, F. & Baron, J. C. (2007). Neural correlates of age-related verbal episodic memory decline: A pet study with combined subtraction/correlation analysis. *Neurobiology of aging*, 28, pp. 1568-1576.
- Bertoli, S., Smurzynski, J., Probst, R. (2002). Temporal resolution in young and elderly subjects as measured by mismatch negativity and a psychoacoustic gap detection task. *Clinical Neurophysiology* 113 (3), pp. 396-406.
- Bieliauskas, L. A. (2005). Neuropsychological assessment of geriatric driving competence. *Brain Injury*, 19, pp. 221–226.
- Blackman, T., van Schaik, P., Martyr, A. (2007). Outdoor environments for people with dementia: An exploratory study using virtual reality. *Ageing and Society*, 27 (6), pp. 811-825.
- Blennow, K., de Leon, M.J., & Zetterberg, H. (2006). Alzheimer's disease. *Lancet*, 368 (9533), pp. 387-403.
- Bowman, D., Gabbard., J. Hix, D. A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1996, 11(4), 404-424.
- Bronnick, K., Ehrt, U., Emre, M., De Deyn, P.P., Wesnes, K., Tekin, S., Aarsland, D. (2006). Attentional deficits affect activities of daily living in dementia-associated with Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 77 (10), pp. 1136-1142.
- Brooks, B.M., Rose, F.D., Attree, E.A., Elliot-Square, A. (2002). An evaluation of the efficacy of training people with learning disabilities in a virtual environment. *Disability and Rehabilitation*, 24(11-12), 622-626.
- Brooks, B.M., McNeil, J.E., Rose, F.D., Greenwood, R.J., Attree, E.A., Leadbetter, A.G. (1999). Route learning in a case of amnesia: A preliminary investigation into the efficacy of training in a virtual environment. *Neuropsychological Rehabilitation* 9 (1), pp. 63-76.
- Bruce, P. R., & Herman, J. F. (1983). Spatial knowledge of young and elderly adults: scene recognition from familiar and novel perspectives. *Experimental Aging Research*, 9, pp. 169-173.
- Buracchio, T., Kaye, J. Early Diagnosis of Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment: Imaging, Biomarkers, and Technology. *Journal of the American Society on Aging*, 2009, 33(1), 18-23.
- Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, pp. 77-97.
- Burgess, N., Trinkler, I., King, J., Kennedy, A., Cipolotti, L. (2006). Impaired Allocentric spatial memory underlying topographical disorientation. *Reviews in the neurosciences*, 17, 239-251.
- Burgess, P.W., Quayle, A., & Frith, C. D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia*, 39, 545–555.
- Castilla-Rilo, J. Lopez-Arrieta, J. Bermejo-Pareja, F., Ruiz, M., Sanchez-Sanchez, F. Trincado, R. Instrumental activities of daily living in the screening of dementia in population studies: a systematic review and meta analysis. *International journal of geriatric psychiatry*, 2007, 22, 829-836.

- Chao, L. L. & Knight, R., T. (1997). Prefrontal Deficits in Attention and Inhibitory Control with Aging. *Cerebral Cortex*, 7, pp. 63-69.
- Charness, N. Aging and Human Performance. *Human factors*, 2008, 50(3), 548-555.
- Cherrier, M. M., Mendez, M., & Perryman, K. (2001). Route learning performance in Alzheimer disease patients. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 14 (3), pp. 159-168.
- Chevignard, M., Taillefer, C., Picq, C., Poncet, F., Pradat-Diehl, P., (2006). Évaluation du syndrome dysexécutif en vie quotidienne, In Pradat-Diehl, P., Peskine, A. (Eds) Évaluation des troubles Neuropsychologiques en vie quotidienne. Springer-Verlag France, Paris, 2006
- Chiu, Y. -C., Algase, D., Liang, J., Liu, H. -C., & Lin, K. -N. (2005). Conceptualization and measurement of getting lost behavior in persons with early dementia. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 20 (8), pp. 760-768.
- Christiansen, C., Abreu, B., Ottenbacher, K., Huffman, K., Masel, B., & Culpepper, R. (1998). Task performance in virtual environments used for cognitive rehabilitation after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 79, 888–892.
- Cockburn, A., McKenzie, B. Evaluating spatial memory in two and three dimensions. *Int. J. Human-Computer Studies*, 2004, 61, 359–373
- Collette, F., Amieva, H., Adam, S., Hogge, M., Van der Linden, M., Fabrigoule, C., Salmon, E. (2007). Comparison of inhibitory functioning in mild Alzheimer's disease and frontotemporal dementia. *Cortex*, 43, pp. 866–874.
- Cox, D.J., Quillian, W.C., Thorndike, F.P., Kovatchev, B.P., Hanna, G. (1998). Evaluating driving performance of outpatients with Alzheimer disease. *Journal of the American Board of Family Practice* 11 (4), pp. 264-271.
- Craik, F.I.M., & Bialystock, E. (2006). Planning and task management in older adults: cooking breakfast. *Memory & Cognition*, 34 (6), 1236-1249.
- Cronin-Golomb, A. & Amick, M. (2001). Spatial abilities in aging, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease. In F. Boller and S.F. Cappa (Eds.): *Handbook of neuropsychology*, (pp. 119-143).
- Cronin-Golomb, A., Corkin, S., Growdon, J. H. (1994). Impaired problem solving in Parkinson's disease: Impact of a set-shifting deficit. *Neuropsychologia*, 32 (5), pp. 579-593.
- Cronin-Golomb, A., & Braun, A. E. (1997). Visuospatial dysfunction and problem solving in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 11 (1), 44-52.
- Crook, T.H., Younjohn, J.R., Larrabee, G.J. (1990) The misplaced objects test: A measure of everyday visual memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 12(6), 819-833.
- Cushman, L., Stein, K., Duffy, C.J. Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 2008, 71, 888-895.
- Czaja SJ, Charness N, Fisk AD, Hertzog C, Nair SN, Rogers WA, Sharit J. Factors predicting the use of technology: findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychol Aging* 2006;21:333–52.
- Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A.D., Hertzog, C., Nair, S.N., Rogers, W.A., Sharit, J. Factors predicting the use of technology: Findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and Aging*, 2006, 21, 333–352.
- Daigneault, S., Braun, C. M. J., & Whitaker, H. A. (1992). Early effects of normal aging on perseverative and non-perseverative prefrontal measures. *Developmental Neuropsychology*, 8, pp. 99-114.
- Daividsdottir, S., Wagenaar, R., Young, D., & Cronin-Golomb, A. (2008). Impact of optic flow perception and egocentric coordinates on veering in Parkinson's disease. *Brain*, 131 (11), pp. 2882-2893.
- Daividsdottir, S., Cronin-Golomb, A., & Lee, A. (2005). Visual and spatial symptoms in Parkinson's disease. *Vision Research*, 45 (10), pp. 1285-1296.
- De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gardini, S. (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology*, 20 (6), pp. 807-821.

- DeCarli, C., Massaro, J., Harvey, D., Hald, J., Tullberg, M., Au, R., Beiser, A., D'agostino, R., Wolf, P.A. (2005): Measures of brain morphology and infarction in the framingham heart study: establishing what is normal. *Neurobiology of Aging* 26:491–510.
- DeIpoli, A. R., Rankin, K. P., Mucke, L., Miller, B. L., Gorno-Tempini, M. L. (2007). Spatial cognition and the human navigation network in AD and MCI. *Neurology*, 69, pp. 986-997.
- Déjos, M., Sauzéon, H., N'Kaoua, B. (2012). La réalité virtuelle au service de l'évaluation clinique de la personne âgée : le de'pistage précoce de la démence. *Revue neurologique*, 168, 404-414.
- Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E. Ober, B.A. *CVLT California Verbal Learning Test : adult version.Manual*. Toronto : The Psychological Corporation. Harcourt Jovandvich, 1987.
- Derouesné C, Guigot J. A caregiver form of the “Cognitive Difficulties Scale” for assessment of functional impairment in daily life in Alzheimer’s disease. In: Bergener M, Finkel SI, eds. *Treating Alzheimer’s disease and other dementias*. New York: Springer Publishing Co, 1995, 318-28.
- Derouesné, C. (2005). Signification de la plainte mnésique – ou de quoi se plaint-on lorsqu’on se pplaint de la mémoire ? *Neurologie - Psychiatrie – Gériatrie* 25, pp. 14-18.
- Di Bono, M.G., Zorzi, M. (2008). Decoding Cognitive States from fMRI Data Using Support Vector Regression. *PsychNology Journal*, 6(2), 189-201.
- Diekmann, V., Jürgens, R., Becker, W. (2009). Deriving angular displacement from optic flow: A fMRI study. *Experimental Brain Research*, 195 (1), pp. 101-116.
- Dirnberger, G., Frith, C. D., Jahanshahi, M. (2005). Executive dysfunction in Parkinson’s disease is associated with altered pallidal–frontal processing. *NeuroImage*, 25, 588-599.
- Doeller, C. F., King, J. A., & Burgess, N. (2008). Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and boundaries in spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (15), pp. 5915-5920.
- Dollinger, S. M. C. (1995). Mental rotation performance: age, sex, and visual field differences. *Developmental Neuropsychology*, 11, pp. 215–222.
- Drachman, D. A., and Swearer, J. M. (1993). Driving and Alzheimer’s Disease: The risk of crashes. *Neurology*, 43, pp. 2448-2456.
- Driscoll, I., Hamilton D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior*, 47 (3), pp. 326-335.
- Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W. M., Baumgartner, R. N., & Sutherland, R. J. (2003). The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex*, 13, pp. 1344-1351.
- Drzezga, A., Grimmer, T., Peller, M., Wermke, M., Siebner, H., Rauschecker, J. P., et al. (2005). Impaired cross-modal inhibition in Alzheimer dis- ease. *PLoS Medicine*, 2, e288.
- Duchek JM, Hunt L, Ball K, et al. 1998. Attention and driving performance in Alzheimer’s disease. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 53: 130–141.
- Elderkin-Thompson, V., Ballmaier, M., Hellemann, G., Pham, D., & Kumar, A. (2008). Executive function and MRI prefrontal volumes among healthy older adults. *Neuropsychology*, 22, pp. 626-637.
- Elkind JS, Rubin E, Rosenthal S, Skoff B, Prather P. A simulated reality scenario compared with the com- puterized Wisconsin Card Sorting Test: an analysis of preliminary results. *CyberPsychology & Behavior* 2001; 4:489–96.
- Fitten LJ, Perryman KM, Wilkinson CJ, et al. 1995. Alzheimer and vascular dementias and driving. A prospective road and labora- tory study. *JAMA* 273: 1360–1365.
- Flynn D, Van Schaik MP, Blackman T, Fencott C, Hobbs B, Calderon C. Developing a virtual reality–based methodology for people with dementia: a feasibility study. *Cyberpsychol Behav* 2003;6(6):591–611.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R. Minimental state. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 1975, 189-98.
- Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*, 37 (2), pp. 275-292.

- Fournet, N., Mosca, C., Moreaud, O. (2007). Deficits in inhibitory processes in normal aging and patients with Alzheimer's disease: A review | [Déficits des processus inhibiteurs dans le vieillissement normal et la maladie d'Alzheimer]. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillessement* 5 (4), pp. 281-294.
- Franceschi, M., Caffarra, P., De Vreese, L., Pelati, O., Pradelli, S., Savare, R., Cerutti, R., & Grossi, E. (2007). Visuospatial planning and problem solving in Alzheimer's disease patients: a study with the Tower of London test. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 24, pp. 424-428.
- Frittelli, C., Borghetti, D., Iudice, G., Bonanni, E., Maestri, M., Tognoni, G., Pasquali, L., Iudice, A. (2009). Effects of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment on driving ability: A controlled clinical study by simulated driving test. *International Journal of Geriatric Psychiatry* 24 (3), pp. 232-238.
- Fuchs P, Moreau G, Berthoz A, Vercher JL. *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1 L'homme et l'environnement virtuel*. Paris : Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- Gershberg, F. B., Shimamura, A. P. (1995). The role of the frontal lobes in the use of organizational strategies in free recall. *Neuropsychologia*, 13, 1305-1333.
- Grady, C. L., Haxby, J. V., Horwitz, B., Sundaram, M., Berg, G., Schapiro, M., Friedland, R.P., Rapoport, S.I. (1988). Longitudinal study of the early neuropsychological and cerebral metabolic changes in dementia of the Alzheimer type. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 10 (5), pp. 576-596.
- Graham, S. J., Quintin, G., Mraz, R., Hong, J., & Zakzanis, K. K. (2003). Combining virtual reality experiments with functional magnetic resonance imaging: Initial work assessing human spatial navigation. In B. K. Wiederhold, S. Bouchard & G. Riva (Eds.): *Annual review of cybertherapy and telemedicine*, (pp. 83-96). Interactive Media Institute, San Diego.
- Greenwood, P. M. & Parasuraman, R. (1999). Scale of attentional focus in visual search. *Perception & Psychophysics*, 61 (5), pp. 837-859.
- Grober, E., Buschke, H. Genuine memory deficits in dementia. *Developmental Neuropsychology*, 1987, 3, 13-36.
- Gronwall, D. M. A. (1977). Paced auditory serial-addition task: a measure of recovery from concussion. *Perceptual and Motor Skills*, 44, pp. 367-73.
- Grosse, D.A., Wilson, R.S., & Fox, J.H. (1991). Maze learning in Alzheimer's disease. *Brain and Cognition*, 15, 1-9.
- Guimond, A., Braun, C., Rouleau, I., Bélanger, F., Godbout, L. (2006). Remembering the past and foreseeing the future while dealing with the present: A comparison of young adult and elderly cohorts on a multitask simulation of occupational activities. *Experimental Aging Research*, 32 (3), pp. 363-380.
- Gunning-Dixon, F. M. & Raz, N. (2003). Neuroanatomical correlates of selected executive functions in middle-aged and older adults: A prospective MRI study. *Neuropsychologia*, 41, pp. 1929-1941.
- Hamilton, A. C., & Martin, R. C. (2005). Dissociations among tasks involving inhibition: A single-case study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5, 1-13.
- Hawthorn, D. Possible implications of ageing for interface designers. *Interacting with Computers*, 2000, 12, 507-528.
- Hayes, T., Abendroth, F., Adami, A., Pavel, M., Zitzelberger, T., Kaye J. Unobtrusive Assessment of Activity Patterns Associated with Mild Cognitive Impairment. *Alzheimer's & Dementia*, 2008, 4(6), 395-405.
- Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209 (1), pp. 49-58.
- Head, D., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Raz, N. (2008). Neuroanatomical and cognitive mediators of age-related differences in episodic memory. *Neuropsychology*, 22, pp. 491-507.
- Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. G., Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting Test Manual*. Odessa (FL): Psychological Assessment Resources.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Shah, & A. Miyake (Eds.): *The Cambridge handbook of visuospatial thinking*, (pp. 121-169). Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press.

- Hegarty, M., Montello, D.R., Richardson, A.E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Helmstaedter C, Hauff M, Elger CE (1998) Ecological validity of list-learning tests and self-reported memory in healthy individuals and those with temporal lobe epilepsy. *J Clin Exp Neuropsychol* 20 (3): 365-75.
- Henderson, V. W., Mack, W., & Williams, B. W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Archives of Neurology*, 46, pp. 391-394.
- Henry, J. D., & Phillips, L. H. (2006). Covariates of production and perseveration on tests of phonemic, semantic and alternating fluency in normal aging. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 13, 1–23.
- Henry, J. D., MacLeod, M. S., Phillips, L. H., & Crawford, J. R. (2004). A meta-analytic review of prospective memory and aging. *Psychology and Aging*, 19, 27–39. DOI: 10.1037/0882-7974.19.1.27.
- Hillyard, S. A., Anlo-Vento, L. (1998). Event-related potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (3), pp. 781-787.
- Hoehn, M. M. & Yahr, M. D. (1967). Parkinsonism: onset, progression and mortality. *Neurology*, 17, pp. 427-442.
- Hoffman, L., McDowd, J. M., Atchley, P., & Dubinsky, R. (2005). The role of visual attention in predicting driving impairment in older adults. *Psychology and Aging*, 20 (4), pp. 610-622.
- Hofmann M, Rösler A, Schwarz W, Müller-Spahn F, Kräuchi K, Hock C, et al. Interactive computer-training as a therapeutic tool in Alzheimer's disease. *Comp Psychiatry* 2003;44(3): 213–9.
- Hofmann M, Rösler A, Schwarz W, Müller-Spahn F, Kräuchi K, Hock C, Seifritz E. Interactive computer-training as a therapeutic tool in Alzheimer's disease. *Comprehensive Psychiatry*, 2003, 44(3), 213-219
- Hort, J., Laczó, J., Vyhnálek, M., Bojar, M., Bureš, J., & Vlček, K. (2007). Spatial navigation deficit in amnesic mild cognitive impairment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (10), pp. 4042-4047.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196, 187–191.
- Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: Variability and change with practice. *Journal of Neuroscience*, 23 (13), pp. 5945-5952.
- Inagaki, H., Meguro, K., Shimada, M., Ishizaki, J., Okuzumi, H., & Yamadori, A. (2002). Discrepancy between mental rotation and perspective-taking abilities in normal aging assessed by Piaget's Three-Mountain Task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24 (1), pp. 18-25.
- Jones, T. C. & Jacoby, L. L. (2005). Conjunction errors in recognition memory: Modality-free errors for older adults but not for young adults. *Acta Psychologica*, 120, pp. 55-73.
- Kalia, A. A., Legge, G. E., & Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, 37 (11), pp. 1677-1699
- Kalova E, Vlcek K, Jarolimova E, Bures J: Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: corresponding results in real space tests and computer tests. *Behav Brain Res* 2005;159:175- 186.
- Kaskie, B., & Storandt, M. (1995). Visuospatial deficit in dementia of the Alzheimer type. *Archives of Neurology*, 52 (4), pp. 422-425.
- Kavcic, V., Fernandez, R., Logan, D., & Duffy, C. J. (2006). Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain*, 129 (3), pp. 736-746.
- Kennedy RS, Lane NE, Lilienthal MG, Berbaum KS, Hettinger LJ. Profile analysis of simulator sickness symptoms: application to virtual environment systems. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1992;1:295–301.

- Kessels, R. P. C., Feijen, J., & Postma, A. (2005). Implicit and explicit memory for spatial information in Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 20 (2-3), pp. 184-191.
- Kesztyues, T. I., Mehrlitz, M., Schilken, E., Weniger, G., Wolf, S., Piccolo, U., Irle, E., Rienhoff, O. Preclinical evaluation of a virtual reality neuropsychological test system: Occurrence of side effects: *CyberPsychology & Behavior*, 2000, 3(3), 343-349.
- Kim, E., Jung, Y-C, Ku, J., Kim J-J., Lee, H., Kim, S.Y., Cho, H.S. (2009). Reduced activation in the mirror system during a virtual social cognition task in euthymic bipolar disorder. *Progress in Neuro-psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 33, 1409-1416.
- King JA, Hartley T, Spiers HJ, Maguire EA, Burgess N. Anterior prefrontal involvement in episodic retrieval reflects contextual interference. *Neuroimage* 2005 ; 28 : 256-67
- Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychology of Aging*, 6 (1), pp. 10-18.
- Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, 2, 117-134.
- Kliegel, M., Rendell, P. G., & Altgassen, M. (2008). The added value of an applied perspective in cognitive gerontology. In S. M. Hofer, & D. F. Alwin (Eds.), *Handbook of cognitive aging: Interdisciplinary perspectives* (pp. 587-602). Thousand Oaks: Sage Publications.
- Klimkeit, E.I., Bradshaw, J.L., Charlton, J., Stolwyk, R., Georgiou-Karistianis, N. (2009). Driving ability in Parkinson's disease: Current status of research. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 33 (3), pp. 223-231.
- Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., Marié, R.M. Virtual action in Parkinson's disease: a control study. *Cyberpsychol Behav*, 2006, 9(3), 342-347.
- Laczo, J., Andel, R., Vyhnaek, M., Vlcek, K., Magerova, H., Varjassyova, A., et al. (2010). Human analogue of the Morris Water Maze for testing subjects at risk of Alzheimer's disease. *Neurodegenerative Diseases*, 7, 148-152.
- Laczó, J., Vlček, K., Vyhnálek, M., Vajnerová, O., Ort, M., Holmerová, I., Tolar, M., Andel, R., Bojar, M., & Hort, J. (2009). Spatial navigation testing discriminates two types of amnesic mild cognitive impairment. *Behavioural Brain Research*, 202 (2), 252-259.
- Laczó, J., Andel, R., Vlček, K., Macoška, V., Vyhnálek, M., Tolar, M., Bojar, M., & Hort, J. (2011). Spatial Navigation and APOE in Amnesic Mild Cognitive Impairment. *Neurodegenerative Diseases*, (8), 169-177.
- Lafleche, G., Albert, M.S. (1995). Executive function deficits in mild Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 9 (3), pp. 313-320.
- Larrue, F., Sauzeon, H., Gross, H., N'Kaoua, B. Comparaison d'interacteurs de navigation dans le transfert du virtuel au réel ; Joystick VS Tapis Roulant : Application à l'orientation spatiale. *Colloque de prospective PIRSTEC -23 octobre 2009*.
- Larson, P.A., Rizzo, A.A., Buckwalter, J.G., van Rooyen, A., Kratz, K., Neumann, U., Kesselman, C., Thiebaut, M., & van der Zaag, C. (1999). Gender issues in the application of a virtual environment spatial rotation project. *Cyberpsychology and Behavior* 2 (2), pp. 113-123.
- Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., Newman, M. C., Kaszniak, A. W., Nadel, L., & Jacobs, W. J. (2002). Older adults map novel environments but do not place learn: Findings from a computerized spatial task. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 9 (2), pp. 85-97.
- Law, A. S., Logie, R. H., & Pearson, D. G. (2006). The impact of secondary tasks on multitasking in a virtual environment. *Acta Psychologica*, 122 (1), pp. 27-44.
- Lawton, M.P., & Brody, E.M. Assessment of older people: self-maintaining and instrumental activities of daily living. *Gerontologist*, 1969, 9,179-86.
- Le gall, D., Allain, P. Applications des techniques de réalité virtuelle à la neuropsychologie clinique. *Champ Psychosomatique*, 2001, 22, 25-38.
- Lee, A. C., Harris, J. P., & Calvert, J. E. (1998). Impairments of mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 36 (1), 109-114.
- Lee, H. C. (2006). Virtual driving tests for older adult drivers? *British Journal of Occupational Therapy*, 69 (3), pp. 138-141.
- Lee, H. C., Cameron, D., & Lee, A. H. (2003). Assessing the driving performance of older adult drivers: On-road versus simulated driving. *Accident Analysis and Prevention*, 35(5), 797-803.

- Lee, J. H., Wiederhold, B. K., Wiederhold, M. D., Kim, S. I., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee, S. -M., Kang, Y., Kim, D. Y., & Yu, T. (2003). A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *Cyberpsychology and Behavior*, 6 (4), pp. 383-388.
- Leplow, B., Höll, D., Zeng, L., Herzog, A., Behrens, K., & Mehdorn, M. (2002). Spatial behaviour is driven by proximal cues even in mildly impaired Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 40 (8), pp. 1443-1455.
- Levy, G., Jacobs, D.M., Tang, M.-X., Côté, L.J., Louis, E.D., Alfaró, B., Mejia, H., Stern, Y., Marder, K. (2002). Memory and executive function impairment predict dementia in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 17 (6), pp. 1221-1226.
- Lewis, S.J.G., Dove, A., Robbins, T.W., Barker, R.A., Owen, A.M. (2003). Cognitive impairments in early Parkinson's disease are accompanied by reductions in activity in frontostriatal neural circuitry. *Journal of Neuroscience*, 23 (15), pp. 6351-6356.
- Lezak, M. D. (2004). *Neuropsychological assessment* (4th ed.). New York: Oxford University Press.
- Lipman, P. D. & Caplan, L. J. (1992). Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram. *Psychology and Aging*, 7, pp. 435-442
- Lipman, P. D. (1991). Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information. *Psychology and Aging*, 6, pp. 128-133.
- Litvan, L., Mohr, E., Williams, J., Gomez, C., & Chase, T. N. (1991). Differential memory and executive functions in demented patients with Parkinson's and Alzheimer's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 54, 215-229.
- Liu, L., Watson, B., Miyazaki, M., VR for the elderly: quantitative and qualitative differences in performance with a driving simulator. *Cyberpsychology & Behavior*, 1999, 2(6), 567-576.
- Lohman, D. F. (1993). Spatial ability and g. In I. Dennis & P. Tapsfield (Eds.), *Human abilities: Their nature and measurement*, pp. 97-116. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31 (4), pp. 557-564.
- LoPriore, C., Castelnovo, G., Liccione, D., & Liccione, D. (2003). Experience with V-STORE: consideration on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *CyberPsychology & Behaviour*, 6 (3), 281-287.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging*, 20 (4), pp. 683-694.
- Lozza, C., Baron, J.-C., Eidelberg, D., Mentis, M.J., Carbon, M., Marié, R.-M. (2004). Executive processes in Parkinson's Disease: FDG-PET and network analysis. *Human Brain Mapping*, 22 (3), pp. 236-245.
- Mager, R., Stefani, O., Angehrn, I., Mueller-Spahn, F., Bekiaris, E., Wiederhold, B.K., Sulzenbacher, H., Bullinger, A. H. (2005). Neurophysiological age differences during task-performance in a stereoscopic virtual environment. *Applied Psychophysiology Biofeedback* 30 (3), pp. 233-238.
- Maguire, E. A., Burgess, N., & O'Keefe, J. (1999). Human spatial navigation: Cognitive maps, sexual dimorphism, and neural substrates. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 171-177.
- Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E., & Moffat, S. D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research*, 205 (1), pp. 88-95.
- Manchester, D., Priestly, N. & Jackson, H. (2004). The assessment of executive functions: Coming out of the office. *Brain Injury*, 18, pp. 1067-1081.
- Mapstone M, Rosler A, Hays A, Gitelman DR, Weintraub S (2001) Dynamic allocation of attention in aging and Alzheimer's Disease: uncoupling of the eye and the mind. *Arch Neurol*, in press.
- Mapstone, M., Dickerson, K., & Duffy, C. J. (2008). Distinct mechanisms of impairment in cognitive ageing and Alzheimer's disease. *Brain*, 131 (6), pp. 1618-1629.
- Martin, R. (1972), *Test des commissions* (2nde édition), Editest, Bruxelles.
- Mata, R., Schooler, L. & Rieskamp, J. (2007). The aging decision maker: Cognitive aging and the adaptive selection of decision strategies. *Psychology & Aging*, 22 (4), pp. 796-810.
- Mattis S. *Dementia rating scale professional manual*. Odessa: Psychological Assessment Resources, 1976.

- McDaniel M., Einstein G., Jacoby L. (2008). New considerations in aging and memory. The glass may be half full. In F. Craik, A. Salthouse. *Handbook of aging and cognition*. Mahwah, Erlbaum, 251-310.
- McDougall, G. J. Jr., Becker, H., & Arheart, K. L. (2006). Older Adults in the SeniorWISE Study At Risk for Mild Cognitive Impairment. *Archives of Psychiatric Nursing*, 20, 126–134
- McDowd, J. M. (1997). Inhibition in Attention and Aging. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 52B (6), pp. 265-273.
- McGee, J. S., van der Zaag, C., Rizzo, A., Buckwalter, J. G., Neumann, U., Thiebaut, M. Issues for the assessment of visuospatial skills in older adults using virtual environment technology. *CyberPsychology and Behavior*, 2000, 3(3), 469-482.
- McGeorge, P., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Garden, S. E., Della Sala, S., Milne, A. B., Hamilton, S., & Callander, J. (2001). Using virtual environments in the assessment of executive dysfunction. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 10, 375–383.
- McShane, R., Gedling, K., Keene J., Fairburn, C., Jacoby, R., & Hope, T. (1998). Getting lost in dementia: a longitudinal study of a behavioral symptom. *International Psychogeriatrics*, 10 (3), pp. 253-260.
- Meador, K. J., Meador, A. S., Loring, D. W., Lee, G. P., Martin, R. C. (1990). Anterograde Memory for Visuospatial Arrays. *International Journal of Neuroscience*, 51 (1-2), pp. 1-8.
- Messier, J., Adamovich, S., Jack, D., Hening, W., Sage, J., Poizner, H. Visuomotor learning in immersive 3D virtual reality in Parkinson's disease and in aging. *Experimental Brain Research*, 2007, 179 (3), 457-474.
- Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B., & Fernández, G. (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage*, 22 (4), pp. 1503-1514
- Millan-Calenti, J.C., Tubio, J., Pita-Fernandez, S., Gonzalez-Abraldes, I, Lorenzo, T., Fernandez-Arruty, T., Maseda, A. Prevalence of functional disability in activities of daily living (ADL), instrumental activities of daily living (IADL) and associated factors, as predictors of morbidity and mortality. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2010, 50, 306-310
- Moffat, S. D., & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience*, 116 (5), pp. 851-859.
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, 27 (7), pp. 965-972.
- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17 (6), pp. 1274-1282.
- Moffat, S.D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.
- Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's disease: The remembrance of things passed. *Neurology*, 61 (11), pp. 1491-1497.
- Money, I., Alexander, D., & Walker, H. T. (1965). *Manual: Standardized road-map test of direction sense*. Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Montgomery, P., Silverstein, P., Wichmann, R., Fleischaker, K., & Andberg, M. (1993). Spatial Updating in Parkinson's Disease. *Brain and Cognition*, 23 (2), pp. 113-126.
- Morganti, F., Marrakchi, S., Urban, P. P., Iannocari, G. A., & Riva, G. (2009). A virtual reality based tool for the assessment of "survey to route" spatial organization ability in elderly population: Preliminary data. *Cognitive Processing*, 10 (suppl. 2), pp. 257-259.
- Morris, R. G., P. Garrud, J. N. Rawlins, and J. O'Keefe. (1982a). Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature* 297 (5868):681-683
- Morrow, D.G., Rogers, W.A. Environmental Support: An Integrative Framework. *Human Factors*, 2008, 50(4), 589-613.
- Mraz, R., Hong, J., Quintin, G., Richard Staines, W., McIlroy, W.E., Zakzanis, K.K., Graham, S.J. (2003). A platform for combining virtual reality experiments with functional magnetic resonance imaging. *Cyberpsychology and Behavior* 6 (4), pp. 359-368.
- Näätänen R, Paavilainen P, Tiitinen H, Jiang D, Alho K. (1993) ; Attention and mismatch negativity. *Psychophysiology*, 30, 436–50.

- N’Kaoua, B. & Sauzéon, H. (2008) Evaluation cognitive et neuropsychologique à l’aide des applications RV. In JM. Mazaux, P. Pradat-Diehl & V. Brun (Ed.), *R education instrumentalis e après c er brol sion vasculaire*, Edition Masson.
- 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), pp. 86-93.
- O’ Brien, H. L., Tetewsky, S. J., Avery, L. M., Cushman, L. A., Makous, W., & Duffy, C. J. (2001). Visual mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer’s disease. *Cerebral Cortex*, 11 (11), pp. 1083-1092.
- Owsley C, Ball K, McGwin G Jr, et al. 1998. Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults. *JAMA* 279: 1083–1088.
- Pai MC, Jacobs WJ. Topographical disorientation in community-residing patients with Alzheimer disease. *Int J Geriatric Psychiatry* 2004; 19: 250-5
- Parasuraman R, Nestor PG. 1991. Attention and driving skills in aging and Alzheimer’s disease. *Hum Factor* 33: 539–557
- Parasuraman, R. (1998). Probing the attentive brain at work and in disease. *Psychological Science Agenda* (American Psychological Association), pp. 6-8.
- Parasuraman, R., Nestor, P., Greenwood, P. (1989). Sustained-attention capacity in young and older adults. *Psychology and aging* 4 (3), pp. 339-345
- Parasuraman, R., Greenwood, P.M., Haxby, J.V., Grady, C.L. (1992). Visuospatial attention in dementia of the Alzheimer type. *Brain* 115 (3), pp. 711-733
- Passini, R., Rainville, C., Marchand, N., & Joannette, Y. (1995). Wayfinding in dementia of the Alzheimer type: planning abilities. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 17(6), pp. 820-832.
- Passini, R., Pigot, H., Rainville, C., T treault, M.-H. (2000). Wayfinding in a nursing home for advanced dementia of the Alzheimer's type. *Environment and Behavior*, 32 (5), pp. 684-710.
- Perry, R.J., Hodges, J.R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: a critical review. *Brain*, 122 (Pt 3): 383-404. Review.
- Plancher G., Nicolas S., Piolino P. (2008). Apport de la réalité virtuelle en neuropsychologie de la mémoire :  tude dans le vieillissement. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du vieillissement*, 6 (1), 7-22.
- Plancher, G, Gyselinck V, Nicolas, S., Piolino P. (2010). Age effect on components of episodic memory and features binding : A virtual reality study. *Neuropsychology*, 24(3), 379-390.
- Plancher, G, Tirard, A, Gyselinck V, Nicolas, S., Piolino P. (2012). Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer’s disease: Influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia*, (in press).
- Porteus, S. D. (1950). The Porteus Maze Test and intelligence. Palo Alto, CA: Pacific Books.
- Posner MI, Petersen SE (1990) The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci* 13: 25–42.
- Pradat-Diehl, P., Peskine, A., Chevignard, M. (2006). Pourquoi évaluer les troubles neuropsychologiques en vie quotidienne. In : Pradat-Diehl, P & Peskine, A (Eds), *Evaluation des troubles neuropsychologiques en vie quotidienne*, Springer-Verlag France, Paris, pp 1-5.
- Previc, F. (1998). The neuropsychology of 3D space. *Psychological Bulletin*, 124(2), 123-164.
- Pringle, H. L., Kramer, A. F., & Irwin, D. E. (2004). Individual differences in the visual representation of scenes. In D. T. Levin (Ed.), *Thinking and seeing: Visual metacognition in adults and children* (pp. 165–186). Westport, CT: Greenwood/Praege
- Rainville, C., Marchand, N., & Passini, R. (2002). Performances of patients with a dementia of the Alzheimer type in the Standardized Road-Map test of Direction Sense. *Neuropsychologia*, 40 (5), pp. 567-573.
- Rainville, C., Passini, R., & Marchand, N. (2001). A multiple case study of wayfinding in dementia of the Alzheimer type: Decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 8, 54–71.
- Rand, D., Rukan, S. B. A., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009). Validation of the Virtual MET as an assessment tool for executive functions. *Neuropsychological Rehabilitation*, 19 (4), pp. 583-602.

- Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In *Handbook of Aging and Cognition—II* (F. I. M. Craik and T. A. Salthouse, Eds.). Erlbaum, Mahwah, N. J.
- Raz, N., Gunning, F. M., Head, D., Dupuis, J. H., McQuain, J. D., Briggs, S. D., Loken, W. J., Thornton, A. E., & Acker, J. D. (1997). Selective aging of the human cerebral cortex observed in vivo: Differential vulnerability of the prefrontal gray matter. *Cerebral Cortex*, 7, pp. 268-282.
- Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K.M., Kennedy, K.M., Head, D., Williamson, A., Dahle, C., Gerstorf, D., Acker, J.D., 2005. Regional brain changes in aging healthy adults: General trends, individual differences, and modifiers. *Cerebral Cortex*, 15, pp. 1676-1689.
- Regan, E., Price, K.R. The frequency of occurrence and severity of side-effects of immersion virtual reality. *Aviation, Space, & Environmental Medicine*, 1994, 65, 527–530.
- Reid, W., Broe, G., Creasey, H., Grayson, D., McCusker, E., Bennett, H., Longley, W., Sulway, M.R. (1996). Age at onset and pattern of neuropsychological impairment in mild early-stage Alzheimer disease: A study of a community-based population. *Archives of Neurology* 53 (10), pp. 1056-1061
- Reitan, R. M. The trail making test: Manual for administration and scoring. Tucson: Neuropsychology Laboratory, 1992.
- Rialle, V. *Technologie et Alzheimer : Appréciation de la faisabilité de la mise en place de technologies innovantes pour assister les aidants familiaux et pallier les pathologies de type Alzheimer*. Thèse (PhD) doct Univ. Paris V, 2007.R
- Rizzo, M., McGehee, D.V. Dawson, J.D.; Anderson, S.N. (2001). Simulated Car Crashes at Intersections in Drivers With Alzheimer Disease. *Alzheimer Disease & Associated Disorders*. 15(1), 10-20.
- Rizzo, A.A., Schultheis, M.T., Kerns, K. & Mateer, C. (2004). Analysis of Assets for Virtual Reality Applications in Neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14(1-2), pp. 207-239.
- Rizzo, M., Reinach, S., McGehee, D., Dawson, J. (1997). Simulated car crashes and crash predictors in drivers with alzheimer disease. *Archives of Neurology* 54 (5), pp. 545-551
- Robert-Bobée I. (2006), “Projection de population 2005-2050 pour la France métropolitaine”, Working Paper, Insee, Methodes et Résultats, n° F0603
- Rogé, J., Pébayle, T. (2009). Deterioration of the useful visual field with ageing during simulated driving in traffic and its possible consequences for road safety. *Safety Science* 47 (9), pp. 1271-1276.
- Rowe, M. (2003). Persons with dementia who become lost in the community: preventing injuries and death. *American Journal of Nursing*, 103 (7), pp. 32-40.
- Ruddle, R.A., Lessels, S. The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2009, 16 (1), 1-18.
- Salthouse, T. A. (1992). Reasoning and spatial abilities. In *F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): Handbook of aging and cognition*, (pp.167-212). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sanchez, M., Grober, E., & Birkett, D. (1997). Dementia in left brain damage. *Clinical Gerontologist*, 17, pp. 13-22.
- Sauzçon, H. & N’Kaoua, B. (2008). La Réalité Virtuelle (RV) comme outil d’évaluation cognitive de la personne âgée. Xème Colloque International sur le Vieillissement Cognitif, Université Paris Descartes, 4-5 Septembre, France.
- Sayers, H. Desktop virtual environments: a study of navigation and age. *Interacting with Computers*, 2004, 16, 939–956.
- Scally, K., Charlton, J.L., Jansek, R., Bradshaw, J.L., Moss, S. & Georgiou-Karistianis, N. (2011). Impact of external cue validity on driving performance in Parkinson's disease. *Parkinson's Disease*, art. no. 159621.
- Schultheis, M.T. Himelstein, J., Rizzo, A.A. Virtual reality and neuropsychology: Upgrading the current tools. *J Head Trauma Rehabil*, 2002, 17, 379-94.
- Schwebel, D. C., Ball, K. K., Severson, J., Barton, B. K., Rizzo, M., & Viamonte, S. M. (2007). Individual difference factors in risky driving among older adults. *Journal of Safety Research*, 38, pp. 501-509.

- Sekuler, A. B., Bennett, P. J., Mamelak, M. (2000). Effects of aging on the useful field of view. *Experimental Aging Research*, 26, pp. 103-120.
- Severson, J., Rizzo, M., Wagner, J., Cremer, J., Best, A.F., Severson, M.A. Driving
 Shallice, T., Burgess, P.W. (1991), Higher order cognitive impairments and frontal lesions in man, In *Frontal Lobe Function and dysfunction* (H S Levin, H M Eisenberg and A L Benton), Oxford University Press, New York, pp.125-138.
- Shechtman, O., Classen, S., Stephens, B., Bendixen, R., Belchior, P., Sandhu, M., et al. (2007). The impact of intersection design on simulated driving performance of young and senior adults. *Traffic Injury Prevention*, 8, 78–86.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171 (3972), pp. 701-703.
- Sikkes S. A. M., De Lange-De Klerk E. S. M., Pijnenburg Y. A. L., Scheltens P., Uitdehaag B. M. J. (2009) A systematic review of Instrumental Activities of Daily Living scales in dementia : room for improvement. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*, 80(1), 7-12 .
- Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychology and aging*, 7 (3), pp. 389-394.
- Sjölinder, M., Höök, K., Nilsson, L.-G., Andersson, G. (2005). Age differences and the acquisition of spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an overview map as a navigation aid. *International Journal of Human Computer Studies*, 63 (6), pp. 537-564.
- Spieler, D. H., Balota, D. A., & Faust, M. E. (1996). Stroop performance in healthy younger and older adults and in individuals with dementia of the Alzheimer's type. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 461–479.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17 (8), 618-626.
- Spooner, D.M., Pachana, N. A. (2006). Ecological validity in neuropsychological assessment : A case for greater consideration in research with neurologically intact populations. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21, 327-337.
- Stirk, J.A., & Foreman, N. (2005). Assessment of visual-spatial deficits in patients with Parkinson's disease and closed head injuries using virtual environments. *Cyberpsychology and Behavior*, 8 (5), 431-440.
- Stolwyk, R.J., Charlton, J.L., Triggs, T.J., Iansek, R., Bradshaw, J. L. Neuropsychological function and driving ability in people with Parkinson's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 2006, 28, 898-913.
- Stolwyk, R.J., Triggs, T.J., Charlton, J.L., Iansek, R., Bradshaw, J.L. Impact of internal versus external cueing on driving performance in people with Parkinson's disease. *Official Journal of the Movement Disorder Society*, 2005, 20(7), 846-57.
- Sunderland, A., Harris, J. E., & Baddeley, A. D. (1983). Do laboratory tests predict everyday memory? A neuropsychological study. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 22, 341–357.
- Taconnat, L., Clarys, D., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., Isingrini, M. (2007). Aging and strategic retrieval in a cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. *Brain and Cognition*, 64 (1), pp. 1-6.
- Tippett, W.J., Lee, J.H., Zakzanis, K.K., Black, S.E., Mraz, R., Graham, S.J.. Visually navigating a virtual world with real-world impairments: a study of visually and spatially guided performance in individuals with mild cognitive impairments. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 2009, 31(4), 447-454.
- Troyer, A., K. Moscovitch, M., Winocur, G. (1997). Clustering and switching as two components of verbal fluency: Evidence from younger and older healthy adults. *Neuropsychology*, 11 (1), pp. 138-146.
- Tulving E., (2002). Episodic Memory : From Mind to Brain. *Annual Review of Psychology*, vol. 53, 1-25.
- Tuttle, S. Cassavaugh, N. & Backs, W. (2009). Attention Function Structure of Older and Younger Adult Drivers. *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment Training and Vehicle Design*, pp. 506-513.

- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Dastrup, E., Sparks, J.D., Dawson, J.D. Driving under low-contrast visibility conditions in Parkinson disease. *Neurology*, 2009, 73(14), 1103-1110.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Shi, Q., Dawson, J.D. Driver route-following and safety errors in early Alzheimer disease. *Neurology*, 2004, 63(5), 832-837.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Sparks, J.D., Rodnitzky, R.L., Dawson, J.D. Impaired navigation in drivers with Parkinson's disease. *Brain*, 2007, 130, 2433-2440.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S. W., Qian, S., Rodnitzky, R. L., & Dawson, J. D. (2005). Visual dysfunction in Parkinson disease without dementia. *Neurology*, 65 (12), 1907-1913.
- Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Sparks, J., Rodnitzky, R.L., Dawson, J.D. (2006). Impaired visual search in drivers with Parkinson's disease. *Annals of Neurology* 60 (4), pp. 407-413.
- Van der Linden, M., Wijns, C., Von Frenkell, R., Coyette, F., & Seron, X. Un questionnaire d'auto-évaluation de la mémoire (QAM). Bruxelles: Editest, 1989.
- Verghese, J., Buschke, H., Viola, L., Katz, M., Hall, C., Kuslansky, G., Lipton, R. (2002). Validity of divided attention tasks in predicting falls in older individuals: a preliminary study. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50, pp. 1572-1576.
- Wechsler, D. (2001). Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition. ECPA.
- Waller, D., Bachmann, E., Hodgson, E., & Beall, A. C. (2007). The HIVE: A huge immersive virtual environment for research in spatial cognition. *Behavior Research Methods*, 39 (4), 835-843.
- Waller, D., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2004). Using virtual environments to assess directional knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, 24 (1), pp. 105-116
- Wechsler D (1987) Wechsler Memory Scale – Revised. New York: Psychological Corporation. Traduction française : WMS-R (1991), Paris : ECPA. 3e (2001), Paris ECPA
- Wechsler D. (1997). *Wechsler Memory Scale—Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation
- Weniger, G., Siemerikus, J., Schmidt-Samoa, C., Mehlitz, M., Baudewig, J., Dechent, P., & Irle, E. (2010). The human parahippocampal cortex subserves egocentric spatial learning during navigation in a virtual maze. *Neurobiology of Learning and Memory*, 93 (1), 46-55. doi: 10.1016/j.nlm.2009.08.003.
- Weniger, G., Ruhleder, M., Lange, C., Wolf, S., & Irle, E. (2011). Egocentric and allocentric memory as assessed by virtual reality in individuals with amnesic mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 49 (3), 518-527.
- Werner P, Korczyn A: Mild cognitive impairment: conceptual, assessment, ethical, and social issues. *Clin Interv Aging* 2008; 3: 413-420.
- West, R.L. (1996) An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*. 120, pp. 272-292.
- Whitbourne, S. Physical changes in the aging individual. In Nordhus, I.H., Vandenbos, G.R., Berg, S., Fromholt, P. (Eds.) *Clinical geropsychology*. Washington-DC: American Psychological Association, 1998.
- Widmann C., Beinhoff U., Riepe M. (2010). Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease, *Journal of Neurobiology of Aging*
- Widmann, C.N., Beinhoff, U., Riepe, M.W. Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, 2010, (in press).
- Wilkniss, S. M., Korol, D. L., Gold, P. E., Jones, M. G., & Manning, C. A. (1997). Age-related differences in an ecologically based study of route learning. *Psychology and Aging*, 12 (2), pp. 372-375
- Willis, S., Allen-Burge, R., Dolan, M. M., Bertrand, R. M., Yesavage, J., & Taylor, J. L. (1998). Everyday problem solving among individuals with Alzheimer's disease. *The Gerontologist*, 38, 569-577.
- Wilson, B. A, Cockburn, J., Baddeley, A. D. (1993) The Rivermead Behavioral Memory Test. Bury St Edmunds: Thames Valley Test Company. Traduction française : RBMT, Paris, ECPA.
- Wilson, P. (1997). Use of virtual reality computing in spatial learning research. In N. Foreman & N. Gillett (Eds.), *Handbook of spatial research paradigms and methodologies: Vol. I. Spatial cognition in the child and adult*, (pp. 181-206). Hove, U.K.: Psychology Press.
- Wolbers, T., & Hegarty, M., (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (3), pp. 138-146.

- Woo, B.K.P., Harwood, D.G., Melrose, R.J., Mandelkern, M.A., Campa, O.M., Walston, A., Sultzer, D.L. (2010). Executive deficits and regional brain metabolism in Alzheimer's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 25 (11), pp. 1150-1158.
- Wood, J.M., Worringham, C., Kerr, G., Mallon, K., Silburn, P. (2005). Quantitative assessment of driving performance in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 76 (2), pp. 176-180.
- Wright, R. E. (1981). Aging, divided attention, and processing capacity. *Journal of Gerontology*, 36, 605-614.
- Yetka, A.A., Pickwell, L.D., Jenkins, T.C. Binocular vision: Age and symptoms. *Ophthalmic Physiological Optics*, 1998, 9,115-120.
- Young, S., Morris, R., Toone, B., & Tyson, C. (2007). Planning ability in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology*, 21 (5), 581-589.
- Zajicek, M., Patterns for encapsulating speech interface design solutions for older adults, *Proceedings of the 2003 ACM Conference on Universal Usability (CUU03)*, 10–11 November, Vancouver, Canada, 2003, pp. 54–60.
- 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), CR140-CR150.
- Zamarian, L., Sinz, H. Bonatti, E., Gamboz, N., Delazer, M. (2008). Normal aging affects decisions under ambiguity, but not decisions under risk. *Neuropsychology* (22), pp. 645-665.
- Zesiewicz, T.A., Cimino, C.R., Malek, A.R., Gardner, N., Leaverton, P.L., Dunne, P.B., et al. (2002). Driving safety in Parkinson's disease. *Neurology*, 59, 1787–1788.
- Zhang L, Abreu BC, Seale GS et al. (2003) A virtual reality environment for evaluation of a daily living skill in brain injury rehabilitation: reliability and validity. *Arch Phys Med Rehabil* 84 (8): 1118-24
- Zook N, Welsh MC, Ewing V. Performance of healthy, older adults on the Tower of London Revised: associations with verbal and nonverbal abilities. *Aging, Neuropsychology & Cognition* 2006; 13:1–19.

Navigational difficulties in the elderly and patients suffering from Alzheimer's disease (AD).

Neuropsychology
(Soumis)

Déjos, M. Sauzéon, H., Taillade, M. Larrue, F. N'Kaoua, B.

Abstract:

Objective: Even if disorders in spatial orientation are an early symptom of dementia, very few studies have investigated the navigation difficulties of AD by using a large-scale VR environment. The aim of this study is to compare the performance of young, older and AD subjects in spatial capabilities by using small-scale and VR large-scale assessment according to the subject's neuropsychological profile. Finally, small and large-scale skills have also been linked to self-reported sense of direction.

Method: Twenty young adults, 18 older adults, and 15 patients with AD, were required to learn a route in a VR environment and reproduce it in the same environment. This evaluation was completed by a sketch-mapping task, a scene-sorting task, and different psychometric tests of small-scale skills.

Results: Aging has a detrimental effect on small-scale skills that require active manipulation of spatial information, whereas AD affects also simple perceptual-based spatial skills. For large-scale abilities, aging affects, in addition to the wayfinding activity, the scene-sorting and sketch-mapping tasks. Moreover, AD leads to worsening difficulties in sketch-mapping and wayfinding tasks suggesting greater difficulties in the use of configurational knowledge. Visual memory and executive decline partly explain the difficulties of navigation in the elderly subjects, whereas increasing memory difficulties mainly explain the navigational difficulties in AD patients. Finally, the correlation between wayfinding and self-assessment of sense-of-direction tends to be significant in young subjects, but not in older ones and AD patients. All these results provide relevant information for better understanding of the difficulties in navigation related to old age and AD. 2

1. Introduction

Everyday activity disorders associated with aging are some of the major issues in current neuropsychological studies. This growing interest in the restriction in everyday activities can be explained by several reasons, but partly because a decline in these capabilities is a criterion for early diagnosis of dementia (APA, 2000; McKhann et al. 84).

One of the most studied of these everyday activities is the spatial abilities which have been shown to be predictive of performance on a wide variety of everyday tasks (Vlcek, 2011). These capabilities decline with age, compromising the autonomy of elderly people (Rainville et al., 2001; Shane et al., 1998; Vlcek, 2011) who prefer familiar places rather than the unfamiliar, and are slower and less accurate at finding their way in new environments (Moffat et al. 2001; Newman & Kaszniak, 2000). In addition, the aging cognitive diseases, and most specifically mild cognitive impairment and Alzheimer's disease (AD), are associated with wayfinding problems in the early stages of the disease (eg. Henderson et al., 1989; Monacelli et al., 2003; Algase, et al. 2004; Pai & Jacobs, 2004; Iachini et al. 2009; Cronon-Golomb et Amick, 2001). Numerous laboratory based evidence has supported that age-related differences in navigation behavior are critically mediated by memory decline as well as by age-related decline in executive functioning (eg. Antonova et al., 2009; Driscoll et al., 2003; Meulenbroek et al., 2004; Moffat et al., 2006; Moffat, Kennedy, Rodrigue & Raz, 2007; Taillade et al., 2012; for review, Moffat, 2009).

The spatial abilities needed for navigational activities in everyday live refer to environmental or large scale spatial cognition which needs to be differentiated from small scale spatial cognition. These latter abilities are assessed by psychometric tests, including tasks such as mental rotation of shapes, solving mazes, and finding hidden figures (Carroll, 1993; Eliot & Smith, 1983; Lohman, 1988; McGee, 1979).

Aging, AD patients and small-scale spatial abilities

Several studies show that age has no detrimental effect on passive tasks requiring only perceptual-based comparisons or pure maintenance of spatial information. In contrast, age affects tasks requiring active manipulation and strategic control of spatial information (see Moffat, 2009 for revue). For example, Dror and Kosslyn (1994) studied the effect of aging on

four components of mental imagery: generation, maintenance, scanning and transformation (rotation). They show an impairment in image generation and transformation but not in image maintenance and scanning. Other studies confirmed the detrimental effect of age on tasks requiring an active manipulation of spatial information (Ruggiero, G., et al., 2008; Iachini et al., 2008; Cornoldi & Vecchi 2003). Visual spatial abilities are also impaired in AD patients and some authors have suggested that these deficits might constitute an early predictor of AD (Baudic et al., 2006; Buccione et al., 2007). As for normal aging, studies have confirmed that AD patients are more impaired on spatial tasks soliciting attentional and executive resources (Vecchi et al., 1998; Lineweaver, 2005; Toepper, et al., 2008; Baudic et al., 2006; Buccione et al., 2007). However, if the evaluation of small-scale abilities provides information on visual spatial skills, research suggests that these psychometric measures are relatively weak predictors concerning environmental spatial tasks (Allen, Kirasic, Dobson, Long, & Beck, 1996; Bryant, 1982, 1991; Goldin & Thorndyke, 1982; Lorenz & Neisser, 1986; Pearson & Lalongo, 1986; Hegarty et al., 2002; 2006).

Aging, AD patients and large-scale spatial abilities

Large scale spatial ability has greatly benefited from the development of virtual reality (VR) technology, and several studies have demonstrated that spatial knowledge acquired in virtual environments is quite similar to that acquired in real environments (*e.g.*, Witmer et al., 1996; Ruddle, Payne & Jones, 1997; Waller et al., 1998; Foreman et al., 2000, Wallet et al., 2009; 2010; 2011). Moreover, the VR based assessments were more sensitive to the older subjects' cognitive complaints in everyday activities (self-reported measurements) than the standard testing (Skelton, 2000; Plancher et al. 2012) and provide a good indicator of the presence and severity of spatial problems in everyday life.

In normal aging, studies have reported very similar age-effects in some spatial tasks by using real environment (RE) or virtual environment (VE). For example, a decline in free recall or recognition of landmarks is reported after a navigation task in VE (Cushman et al. 2008; Head et al., 2010; Jansen et al. 2010; Liu et al. 2011) which corroborate RE studies (Bruce et al., 1983; Kirasic, 1991; Lipman, 1991; Monacelli et al. 2003). Tasks assessing route learning were particularly affected by age, such as temporal ordering of landmarks or scenes (Lipman, 1991, for different results see *e.g.* Wilkniss et al. 1997; Taillade et al., in preparation) or wayfinding activity, both in RE (Barrash, 1994; Monacelli et al., 2003; Wilkniss et al., 1997;

Taillade et al., in preparation) and in VE (Cushman et al., 2008; Meulenbroek et al., 2004; Head and Isom, 2010; Iaria et al., 2009; Liu et al., 2011; Plancher, et al. 2008; 2010; Zakzanis et al. 2009). Survey spatial processing is also impaired by age in RE (Kirasic, 1991, 2000; Simon et al., 1992) or VE (Jansen et al., 2010; Head and Isom, 2010; Moffat et al., 2006; Foreman et al., 2005; Iaria et al., 2009) with elderly subjects being generally more impaired in allocentric than egocentric spatial abilities (eg., Desrocher and Smith, 1998) and in learning an unfamiliar environment (Barrash, 1994; Caplan and Lipman, 1995; Wikniss et al., 1997).

Disorders in spatial orientation (large scale abilities) are also considered an early symptom of dementia (Braak, H., and Braak, E., 1991), and often attributed to hippocampal damage (Carli et al., 1997). Clinically relevant impairment in navigational skills (“getting lost” and “wandering”) are often apparent in the early stages of Alzheimer’s disease, sometimes before verbal memory deficits appear. AD may affect journeys in unfamiliar and large-scale environments while, at a more advanced stage, orientation difficulties may concern very familiar environments. Patients have a tendency to become lost and then wander even in familiar surroundings. Kalova (2005) compared results from the real tests with their map view using computer analogues. He found that the AD group was impaired, compared to the control group, in allothetic navigation for a hidden goal and in remembering the presentation order of several locations, with similar results in VE and in RE. In the Kavcic (2006) study, the largest differences between AD and older adult subjects were measured by sub-tests that require identifying the location along a test route that corresponds to a photographically or videographically displayed scene from the route. For these authors, these results suggest particular impairment of the ability to link that type of navigational information into an integrated cognitive map of the environment. Cushman et al. (2008) found also strong correlations between navigational capacities in real-world and virtual environments which are not fundamentally altered by aging or AD. Normal aging affects mainly photo recognition (of the learned route) from real-world and virtual testing, video location (identification of the location of a portion of the route presented on a video clip) in the real world environment and self-orientation in the virtual environment. Moreover, landmark recall and photo location (identification of the location of a portion of the route presented on a photo) differentiated older subjects from AD patients reflecting, for these

authors, an additional decline in visual associative capacity in AD patients. Nevertheless, in this study, behavioral measurements of navigational capacity in a virtual environment seem to differentiate early AD patients from older subjects, which is an essential tool from a clinical perspective.

Aging, AD patients and self assessment of everyday spatial memory

Numerous studies have shown that self-reported sense-of-direction is highly correlated with measurements of spatial knowledge acquired from direct experience (Hegarty, Richardson, Montello, Lovelace, & Subbiah, 2002; Lorenz & Neisser, 1986; Montello & Pick, 1993) but very weakly correlated with paper-and-pencil measurements of spatial ability (Bryant, 1982; Hegarty et al., 2002; Sholl, 1988). Given the close relationship between the results obtained in real and virtual environments, an expected outcome was that self-reported sense-of direction would be more connected to virtual assessment than to classical psychometric measurements. Hegarty et al. (2006) found that self-reported sense-of-direction predicts learning assessed with a real environment and (to a lesser extent) with visual media (video or VE), but also with classical psychometric scales (mental rotation, embedded figure, arrow span). However, Plancher et al. (2012) used a virtual episodic memory task with a spatial component and show that the patients' daily memory complaints were more highly correlated with the performance on the virtual test than with the performance on the classical memory test.

Age effect on self-rating of spatial abilities has also been studied in relation to small and large scale skills. Overall, it has been shown that self-reported spatial abilities in the elderly are not in line with the results obtained in spatial psychometric tests (De Beni, 2006) or in a wayfinding task (Taillade 2012). Many authors have already reported that self-rated memory functioning is only moderately related to the actual memory test performance of healthy elderly individuals (Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2011; see Hertzog & Hultsch, 2000; Hertzog and Dunlosky, 2011, for reviews), and this inconsistency has notably been related to age decline in both memory and executive functioning (Chua, Schacter & Sperling, 2009; see Hertzog and Dunlosky, 2011, for review). However, as for elderly subjects, Plancher et al. (2012) reported that performance on different indicators derived from a VR episodic memory test (recall of element, temporal and spatial information, binding and spatial

recognition) correlated with daily memory complaints assessed with the Subjective Cognitive Difficulties Scale (CDS, McNair & Kahn, 1983), while scores on a psychometric verbal test failed to correlate with the CDS.

From the above data, it appears that even if disorders in spatial orientation are considered an early symptom of dementia, very few studies have investigated the navigation difficulties of AD patients by using a large scale VR environment. With this in mind, the aim of this study is to compare the performance of young subjects, older subjects and AD patients in spatial capabilities by using small scale and VR large scale assessment. For a better understanding of the difficulties experienced by the elderly and AD patients in navigation, performance in the VR wayfinding task has been linked with the subject's neuropsychological profile, and particularly with his/her memory and executive skills. Finally, small and large scale skills have been also linked to daily memory complaints as a means of evaluating the VR's ability to predict self-reported sense of direction, and to discuss the pertinence of VR large scale evaluation in differentiating normal elderly people from those in the early stage of Alzheimer's disease.

2. Methods

2.1. Subject groups.

Twenty young normal control (YNC) adults (10 male and 10 female; age = 22.9; SD = 3.5), 18 older normal control (ONC) (7 male and 11 female; age = 72.7; SD = 8.1), and 15 patients with AD (8 male and 7 female; age = 78.1; SD = 7.6), voluntarily participated in this study. All were native French speakers and right-handed.

The young adults were students at the Segalen University in Bordeaux and the ONC were recruited through an open program at Bordeaux University. Patients were recruited through the memory center of Bordeaux-Hospital or through nursing home partners. They were diagnosed by a geriatric neurologist specializing in dementia according to the standard criteria of DSM-IV and NINCDS-ADRDA. Healthy older adults scored at least 27 (max = 30) (indicating an absence of dementia) and filled in a medical questionnaire to verify that they

had no previous neurological or psychiatric disorders and were not undergoing any treatment that would affect their cognition. AD patients scored at least 15 (indicating an early to moderate stage of dementia). All participants gave their informed consent and the study was performed in compliance with the Declaration of Helsinki. The demographic information is presented in Table 1.

All of the subjects were required to complete a French version of the New Technology (NTIC) experience questionnaire (Moffat et al., 2001) and a French version of the 3D Simulator Sickness Questionnaire (SSQ, Kennedy et al. 1994) immediately after the learning phase in the VE.

2.2. Neuropsychological evaluation

Each participant completed several neuropsychological tests. Demographic data and neuropsychological scores are presented for each population in Table 1. Visual spatial abilities were assessed with the forward and the backward visual spatial digit span (Wechsler, 2001), the visual recognition of Benton (Benton, 1965) and the mental rotation test (Vanderberg and Kuse, 1968). In addition, the TMT-B (Reitan, 1986) and the Wais symbol coding test (Wechsler, 1981) were also administered.

[Table 1]

2.3. Equipment and Procedure

The equipment and procedures have been used in previous studies and have already shown their relevance in investigating spatial abilities (Wallet et al.2009; 2011; Taillade et al. in preparation).

The environment

The virtual environment was a 3D scale model of the real environment (9km² area near the Bordeaux hospital), with realistic and visual stimuli, developed using VirtoolsDev 3.5™. The scale of the real environment was faithfully reproduced (measurements of houses, streets, etc.) and photos of several building facades were applied to geometric surfaces in the VE. Significant local and global landmarks (*e.g.*, signposts, signs, and urban furniture) and urban

sounds were included in the VE to make the simulation more realistic. The itinerary was presented to subjects on the basis of an egocentric frame of reference, at head height. It was characterized by an irregular closed loop, 780 meters in length, with thirteen crossroads and eleven changes of direction.

[figure 1]

Apparatus

The equipment, used in a darkened laboratory room, was a DELL Precision M6300 laptop computer (RAM: 3GHz; processor: Intel Core 2 Duo T9500 2.60 Ghz) with an NvidiaQuadro FX 1600M graphics card (256Meg), a 2 x 1.88 meter screen (to facilitate proper immersion of the subject), a projector (Optoma/ThemeScene from Texas Instruments) with rear projection. The participants were placed two meters from the display screen and used a joystick (a Saitek X52 Pro Flight System joystick) to navigate in VE.

Procedure

Training session

The virtual environment used for the training session was different from that which was used subsequently for the test. This session allowed the participants to familiarize themselves with virtual reality and with the use of the joystick, and to verify that subjects had no major simulator sickness. The training session lasted until the participants felt familiar with the equipment.

Learning session

The virtual route to be learned was 787 meters long, and was composed of 13 intersections and 11 changes of direction (the survey map is presented in figure 1). The subject traces the route using a joystick following the verbal instructions from the tester.

Test session

Three spatial knowledge recall tasks were presented in a counterbalanced order.

- Wayfinding task: participants were required to reproduce the route learned in the virtual world. Direction errors and hesitations (when participants stopped for two seconds or longer) were noted. In the case of errors, participants were stopped and asked to take the

correct direction. In some cases, the participants hesitated followed by a directional error. In all cases, each error or hesitation was counted.

- Sketch-mapping task: participants were required to draw a freehand sketch of the visualized route. The required sketch was a simple outline with connected segments. The score is the correct number of changes of direction, and the subject reaches the maximum score if he/she indicates the correct sequence of changes of direction.

- Scene-sorting task: participants were required to sort a series of 12 pictures taken along the route into chronological order. The number of pictures incorrectly positioned was counted. One point was assigned for a picture in the right place, and 0.5 points for a picture assigned in the wrong place but in the correct sequential order (for example, pictures 2 and 3 placed in 3rd and 4th positions).

Self assessment of everyday cognitive difficulties

The Santa-Barbara Sense of direction scale (Hegarty et al. 2002) was used to assess the difficulties of orientation and navigation that the subject encounters in everyday life.

3. Results

3.1. Neuropsychological assessment

Measurements (mean and standard deviations) obtained for the three groups in all neuropsychological tests are presented table 1).

The groups (YNC, ONC, AD patients) were compared by using a one way variance analysis (ANOVA). Significant differences between the three groups have been observed for all neuropsychological measures investigated, including the Benton [$F(2,50)=53.73$; $p<0.0001$], the visual spatial memory span [$F(2,50)=12.24$; $p<0.0001$], the backward visual spatial memory span [$F(2,50)=35.27$; $p<0.0001$], the TMT-B [$F(2,50)=25.06$; $p<0.0001$], the WSCT [$F(2,50)=178,36$; $p<0.0001$] and the mental rotation test [$F(2,50)=35.27$; $p<0.0001$]. Subsequent analysis showed that YNC and ONC did not differ significantly but have better scores than AD patients for the Benton ($p<0.0001$), the visual spatial memory span ($p<0.0001$), the TMT-B ($p<0.0001$), and the mental rotation test ($p<0.0001$). In addition, YNC have better scores than ONC for the backward visual spatial memory span ($p<0.0001$) and the WSCT ($p<0.0001$).

3.2. Virtual Reality and everyday complaint assessment

Virtual Measurements (mean and standard deviations) obtained for the three groups are presented table 2.

The groups (YNC, ONC, AD patients) were compared by using a one way variance analysis. Differences between the three groups were observed for all measurements, including wayfinding errors [$F(2,50)=39,76$; $p<0.0001$], wayfinding hesitations [$F(2,50)=4.61$; $p<0.05$], scene-sorting [$F(2,50)=10.44$; $p<0.0001$], and sketch-mapping scores [$F(2,50)=20.30$; $p<0.0001$]. Subsequent analysis showed that YNC have better scores than ONC for the wayfinding errors ($p<.01$), the sketch-mapping task ($p<.05$) and the scene-sorting task ($p=.05$), and AD patients have better scores than ONC for the wayfinding errors ($p<.0001$) and the sketch-mapping tasks ($p<.0001$).

[table 2]

3.3 Virtual Reality and neuropsychological predictors

The same procedure was used to compare young and older (aging effect) and older and DTA (specific effect of the disease) performance.

For the young/older comparison, virtual reality measurements (wayfinding errors, wayfinding hesitations, scene-sorting task, sketch-mapping task) were compared with ANOVA following by subsequent post-hoc tests (see table 2) and effect sizes have been computed with η^2 (using the following formula: $\eta^2=(SS\ effect)/(SS\ effect)/(SS\ error)$). Next, an ANCOVA with psychometric measurements as covariables was conducted to investigate the contribution of memory, executive and visual spatial abilities to the VR performance.

A difference between young and old normal controls was observed only for wayfinding errors [$p<.0001$; $\eta^2=.261$] and the sketch-mapping task [$p<.02$; $\eta^2=.165$]. On these two measurements, only the wayfinding error effect was reduced when psychometric measurements were used as covariables. Particularly, the wayfinding error effect was reduced when TMT-B performance was introduced [$p<.02$; $\eta^2=.145$] and also when the Benton performance was introduced [$p=.002$; $\eta^2=.136$]. These results indicate that the age

effect on navigation skills (wayfinding error) is partially explained by age-related executive (TMT-B) and visual memory (Benton) difficulties.

For the older/AD patients comparison, differences (subsequent tests) were observed for wayfinding errors [$p < .0001$; $\eta^2=.374$] and the sketch-mapping test [$p < .0001$; $\eta^2=.461$]. The wayfinding error effect disappears when the Benton and WSCT performance are introduced (ANCOVA), indicating that navigation problems related to AD are in large part explained by difficulties in visual memory and processing speed exhibited by these patients.

3.4 Relationships between classical neuropsychological scores, VR measurements and self assessment of everyday sense-of-direction (SBSOD)

We conducted analyses of Spearman correlations to determine the features that a daily complaint scale such as the SBSOD, shares with both of our VR and classical neuropsychological tests. These correlations were computed separately for each group. Results show a tendency between SBSOD scores and wayfinding-errors ($r= .387$; $p=.08$) and between SBSOD scores and wayfinding-hesitations ($r=.383$; $p=.08$) only for young control subjects. Subjects who complain most about their sens-of-direction tend to make more errors and hesitations in the wayfinding VR task. These tendencies disappear for older normal controls and AD patients. Moreover, no correlation was found between the neuropsychological scores and SBSOD whatever the group of subjects.

[Tables 3 & 4]

Discussion

The aim of this study was to evaluate the performances of young subjects, older subjects and AD patients in spatial abilities by using small scale and VR large scale assessment. The difficulties of navigation of elderly and AD patients (assessed by using VR wayfinding task), have

been linked with subject's neuropsychological profile, (particularly memory and executive abilities) to determine the impact on these cognitive predictors on spatial large scale difficulties encountered in these subjects. Finally, daily memory complaints have been also linked to small and large scale abilities to assess the VR ability to predict self-reported sense of direction, and to discuss the pertinence of VR large scale evaluation to distinguish normal elderly from early stage of Alzheimer disease.

In our study, small scale spatial evaluations were made by using the visuo-spatial (direct and backward) memory span, the Benton and the mental rotation test. Results show that elderly subjects have poorer performance than young subjects only on backward memory span. Dror and Kosslyn (1994) have examined the effects of aging on four aspects of visual mental imagery: image generation (the ability to form visual images), image maintenance (the ability to retain images over time), image inspection (the ability to interpret a pattern in the visual Buffer), and image transformation (the ability to rotate or otherwise alter an imaged pattern). They show an age impairment in image generation and transformation but not in image maintenance and scanning. Others studies (Ruggiero et al., 2008 ; Iachini et al., 2005 ; Iachini et al., 2008) confirmed that aging has a detrimental effect on tasks that require active manipulation and strategic control of spatial information, but no effect on more passive tasks requiring perceptual comparisons or simple maintenance of spatial information (For review, see Iachini et al., 2009). Our results are in line with these last conclusion by showing that only the more attentional and executive demanding task (backward memory span) distinguishes young from older subjects. It should be noted that the mental rotation ability has been shown to be altered with age by some authors (Dror and Kosslyn, 1994 for example). However Iinagaki et al. (2002) have compared young subjects, middle-aged adults and elderly adults on an object-mental rotation task which detects the ability to mentally rotate an image, and a subject-mental rotation task which reveals the ability to mentally change one's perspective. They show that the ability to mentally change one's perspective declines with age, more than the ability to mentally rotate objects.

With regard to AD patients, our results show differences with elderly subjects on all small scale spatial abilities we have investigated. Again, this result is in accordance with previous studies showing that AD patients decline in a large spectrum of visuospatial skills, including visuospatial short term memory (Alescio-Lautier et al., 2007 ; Baudic et al., 2006 ; Buccione et

al., 2007), visual short term memory (Alescio-Lautier, 2007), computer based mental rotation test (Lineweaver et al., 2005) and Backward memory span (Toepper et al., 2008).

Large scale spatial abilities have been investigated by using a virtual neighborhood modelising a real neighborhood of the city of Bordeaux. A task of reproducing a learned path was completed by a scene-sorting task and a sketch-mapping task. In our study, elderly subjects have poorer performances than young subjects in the wayfinding task (errors), in the sketch-mapping task and in the scene-sorting task. The current studies on navigation in the healthy elderly generally agree that older adults experience greater difficulty navigating in an environment than young subject (e.g., Jansen et al., 2010; Rodgers et al., 2010; Mahmood et al., 2009; Moffat and Resnick, 2002). For example, Zakzanis et al. (2009) asked participants to navigate a path through a virtual city as quickly and accurately as possible, and found that young adults navigated more accurately than the older participants. Moreover, performance on the sketch-mapping task is decreased in older compared to young subjects. Even if our sketch-mapping task is not a pure measure of configurational knowledge (in the extent that the path to reproduce is not very complex), this result is consistent with studies showing that the elderly were less likely to create configurational knowledge of the environment and use a map representation to navigate in three-dimensional environments (Iaria et al., 2009; Moffat and Resnick, 2002; Wilkniss et al., 1997). Finally, older subjects are also impaired in the scene-sorting task compared to their young counterpart, confirming that older adults have difficulty retracing a route (Wilkniss, et al., 1997) and putting scenes from the route in the correct order (Lipman, 1991).

Another result in our study, is that the wayfinding performances in young and older normal controls are mainly explained by visual memory (Benton) and executive (TMT-B) abilities. Moreover, ANCOVA analysis show that when these two cognitive predictors are controlled, the age-related decline in wayfinding is diminished, which allows to assume that visual memory and executive functioning partly explains the difficulties of navigation in the elderly subjects. Few studies examined the relation between classical executive, memory functioning, and wayfinding performances in older subjects. Moffat et al. (2007) reported that spatial performances from a virtual Morris Water Maze were closely related to speed of processing, executive and memory cognitive measures, leading them to propose that both

executive/frontal and hippocampal/memory decline play a role in age-related spatial navigation performances. On a wayfinding task, where participants explored a real supermarket with a list of items to purchase, Kirasic (2000) assessed the relationship between mental spatial abilities, spatial layout learning measures (route execution task, scene recognition task, distance ranking task, map placement task), measures of wayfinding behavior (route execution, walking and head movements), and aging. They showed that the relationship between age and wayfinding behavior was mediated in its entirety by the spatial layout learning factor. However, their spatial ability factor contained very different cognitive measures: some of them were really measures of spatial abilities with spatial visualization (i.e., the Surface Development Test; Ekstrom, French, & Harman, 1976), perceptual speed (i.e., the Hidden Figures Test, the Gestalt Completion Test; Ekstrom et al., 1976), and spatial relations (i.e., the Card rotation test by Krauss, 1989). Other measures of their spatial factor seem related to other cognitive functions such as long-term memory (i.e., the Building Memory Test by Ekstrom et al., 1976), that assesses the ability to remember the configuration, location, and orientation of figural stimuli) or executive function (i.e., the Map Planning Test by Ekstrom et al., 1976). As pointed out by Taillade et al. (2012) it is probably for this reason that Kirasic (2000) precise that even if an 'age-related decline in learning environmental layout plays a major role in the age differences in wayfinding, other variables not assessed in the study also play a significant role'. In a correlational study, Taillade et al. (2012) conclude that their results are in favor of both a memory and executive decline views as mediators of age-related differences in wayfinding performances. This conclusion is in agreement with our results and is supported by neuro-imagery-based findings showing that the decline in spatial learning performances in older subjects is related to hippocampal and frontal modifications (Antonova et al., 2009; Driscoll et al., 2003; Meulenbroek et al., 2004; Moffat et al., 2006; Moffat, Kennedy, Rodrigue, & Raz, 2007).

In our study, the AD is associated with a decrease in performances obtained in the wayfinding and sketch-mapping tasks compared to older normal controls. These deteriorations are consistent with the fact that the problems of navigation and orientation in large species may be an early marker of the onset of the disease (Algase, et al. 2004 ; Cherrier, et al. 2001 ; Henderson, et al. 1989 ; Monacelli et al., 2003 ; Vlcek, 2011). Moreover, these results, and in particular those observed on the sketch-mapping task, are agree with the

hypothesis of a major deficit on the elaboration and use of a cognitive map (ie. Survey knowledge or allocentric representation) in AD patients (Kalova et al., 2005; Laczó and al., 2009). In addition, among the small scales measures used as predictors, the wayfinding performances observed in our older subjects and AD patients are mainly explained by visual memory abilities. The ANCOVA analysis allow to precise that the control of this last variable cancels the differences between older subjects and AD patients, which allow to assume that decline in visual memory mainly explained the specificity of AD compared to normal aging (as also found by Déjos et al., 2012). Again, this result support the assumption that if executive decline explain in a large part the difficulties of navigating observed in the elderly subjects, the aggravation of visuoconstructive abilities and visual memory decline widely underline the difficulties of AD patients. In line with this assumption, Depolyi et al. (2007) have investigated, on MCI and AD patients, the relationships between large scale and classical measurements on the one hand, and the level of cortical atrophy on the other hand. They showed that volumetric performance correlated with navigation performance. In particular, the medial temporal and parietal volumes correlated to navigation errors, such as individuals who showed a volumetric loss in these structures (whose integrity is known to be necessary for visual constructive processes and memory abilities), had the greatest difficulties of navigation (see also Kavcic et al. 2006, for similar conclusions). The prevalence of memory difficulties in the decline of navigational abilities of AD patients compared to their older counterparts, is also evidenced by the fact that, from small-scale tests to large-scale activities, all the forms of retrieval of spatial information are deficient in AD patients, whatever the representational level (landmark, route or global configuration) (Iachiniet et al. 2009).

Finally, our results show a marginal linear relationship between the self assessment of everyday sense-of-direction (SBSOD) and both wayfinding errors and wayfinding hesitations, but only for young control subjects. Subjects who complained most about their sense-of-direction tended to make more errors and hesitations in the wayfinding task. These correlations disappeared for older normal controls and AD patients. Moreover, no correlation was found between the neuropsychological scores and SBSOD whatever the group of subjects. The fact that the elderly do not self-report their ability to navigate in the same way that young adults do has already been reported by some authors. For example, De

Beni et al. (2006) compared younger and older people in the Mental Rotation Test and on the Sense of Direction and Spatial Representation (SDSR) Scale. They showed that older people achieved higher scores on the SDSR Scale, but had a lower performance in the Mental Rotation Test compared with younger participants. In the same way, Taillade et al. (2012) reported that the self-estimation of everyday wayfinding difficulties was similar in both young and elderly subjects compared to the elderly subjects, whereas the performance of older subjects were lower than the young subjects in a wayfinding task. Overall, these results confirmed that aging affects the ability to self-assess navigational abilities accurately, probably due to age-related meta-cognitive difficulties (Vanderhill et al., 2010; Taillade et al., 2012). Another explanation could be that the fact that older subjects prefer familiar to unfamiliar environments (Vlcek, 2011; Burns, 1999) to reduce the possibility of error when moving, thereby increasing their self-perception of their spatial skills. Finally, this discrepancy between spatial abilities (in small and large scale) and the subject's complaint increases in DTA probably due to the increase of meta-cognitive problems and to anosognosia commonly observed in these patients (Kashiwa et al., 2005).

To conclude, our results show that aging has a detrimental effect on small scale abilities requiring active manipulation and strategic control of spatial information, whereas AD affects also less resource-demanding spatial skills. For large scale abilities, aging affects, in addition to the wayfinding activity, the scene-sorting and sketch-mapping tasks. Moreover, AD increased the difficulties in sketch mapping and wayfinding tasks suggesting greater impairment in use of configurational knowledge in the early stage of the disease. In terms of cognitive correlates, visual memory and executive decline partly explain the difficulties of navigation in elderly subjects, whereas increased memory difficulties mainly explain the difficulties of navigation in AD patients. Finally, the correlation between wayfinding and self-assessment of sense-of-direction showed a tendency to be significant in young subjects, but not in older subjects and AD patients. All these results provide relevant information to better understand the difficulties of navigation related to age and Alzheimer's disease. They also emphasize the need to better understand the relationship between small-scale abilities, large-scale abilities, wayfinding and self-assessment of everyday sense-of-direction to improve the differentiation between normal aging and the early stages of Alzheimer's disease.

-
- Alescio-Lautier, B., Michel, B.F., Herrera, C., Elahmadi, A., Chambon, C., Tauzet, C., Padan, V. (2007). Visual and visuospatial short-term memory in mild cognitive impairment and Alzheimer disease: Role of attention; *Neuropsychologia*, 45, 1948-1960.
 - Algase, D. L., Beattie, E. R. A., Song, J. -A., Milke, D., Duffield, C., Cowan, B. (2004). Validation of the Algase Wandering Scale (Version 2) in a cross cultural sample. *Aging and Mental Health*, 8 (2), 133-142.
 - Allen, G. L., Kirasic, K. C., Dobson, S. H., Long, R. G., & Beck, S. (1996). Predicting environmental learning from spatial abilities: An indirect route. *Intelligence*, 22, 327–355.
 - American Psychiatric Association (2000). *DSM-IV Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*. 4th Edition (rev). Washington, DC: American Psychiatric Association.
 - Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G.R., Jackson, S.H.D., Morris, R.G., (2009). Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17, 125–143.
 - Barrash, J., (1994). Age-related decline in route learning ability. *Developmental Neuropsychology* 10, 189–201.
 - Baudic S, Barba GD, Thibaudet MC, Smagghe A, Remy P and Traykov L. (2006). Executive function deficits in early Alzheimer's disease and their relations with episodic memory. *Arch Clin Neuropsychol* 21:15-2.
 - Braak, H., Braak, E. (1991). Neuropathological staging of Alzheimer-related changes. *Acta Neuropathol (Berl)*, 82 : 239-259.
 - Bruce, P. R. & Herman, J. F. (1983). Spatial knowledge of young and elderly adults: scene recognition from familiar and novel perspectives. *Experimental Aging Research*, 9, pp. 169-173.
 - Bryant, K. J. (1982). Personality correlates of sense of direction and geographic orientation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 43(6), 1318–1324.

- Bryant, K. J. (1991). Geographical/spatial orientation ability within real-world and simulated large-scale environments. *Multivariate Behavioral Research*, 26(1), 109–136.
- Buccione I, Perri R, Carlesimo GA, Fadda L, Serra L, Scalmana S, et al. (2007). Cognitive and behavioural predictors of progression rates in Alzheimer's disease. *Eur J Neurol* 14: 440-446.
- Burns, P.C., (1999). Navigation and the mobility of older drivers. *The Journals of Gerontology: Series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 54, S49–S55.
- Caplan, L. J., & Lipman, P. D. (1995). Age and gender differences in the effectiveness of map-like learning aids in memory for routes. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 50(3), 126-133.
- Carli M, Luschi R, Samanin R (1997) Dose-related impairment of spatial learning by intrahippocampal scopolamine: antagonism by ondansetron, a 5-HT₃ receptor antagonist. *Behav Brain Res.* 82:185–194.
- Carroll, J. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytical studies*. New York: Cambridge University Press (Chapter 8).
- Cherrier, M. M., Mendez, M., & Perryman, K. (2001). Route learning performance in Alzheimer disease patients. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 14 (3), pp. 159-168.
- Chua, EF, Schacter DL, Sperling RA. 2009. Neural correlates of metamemory: A comparison of feeling-of-knowing and retrospective confidence judgments. *Journal of Cognitive Neuroscience.* 21:1751-1765.
- Cornoldi, C., & Vecchi, T. E. (2003). *Visuo-spatial working memory and individual differences*. Hove, UK: Psychology Press.
- Cronin-Golomb, A. & Amick, M. (2001). Spatial abilities in aging, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease. In F. Boller and S. F. Cappa (Eds.): *Handbook of neuropsychology*, 2 (6), pp. 119-143.
- Cushman, L.A, Stein, K., Duffy, C.J., (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology* 71, 888–895.

- De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gardini, S. (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology*, 20 (6), pp. 807-821.
- Delpolyi, A. R., Rankin, K. P., Mucke, L., Miller, B. L., & Gorno-Tempini, M. L. (2007). Spatial cognition and the human navigation network in AD and MCI. *Neurology*, 69 (10), 986-997.
- Desrocher, M., Smith, M.L., (1998). Relative preservation of egocentric but not allocentric spatial memory in aging. *Brain and Cognition* 37, 91–93.
- Driscoll, I., Hamilton, D.A., Petropoulos, H., Yeo, R.A., Brooks, W.M., Baumgartner, R.N., Sutherland, R.J., (2003). The aging hippocampus: cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex* 13, 1344–1351.
- Dror, I.E, Kosslyn, S.M., 1994. Mental imagery and aging. *Psychology and Aging* 9,90–102.
- Ekstrom, R.B., French, J.W., Harman, H.H., 1976. Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests. Educational Testing Service, Princeton, NJ.
- Eliot, J., & Smith, I. M. (1983). An international directory of spatial tests. Windsor Berkshire: NFER-Nelson.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "'Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician". *Journal of psychiatric research*, 12(3), 189-198.
- Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*, 37 (2), pp. 275-292.
- Goldin, S. E., & Thorndyke, P. W. (1982). Simulating navigation for spatial knowledge acquisition. *Human Factors*, 24, 457–471.
- Head, D., Isom, M., (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research* 209, 49–58.
- Hegarty, M., Richardson, A.E., Montello, D.R., Lovelace, K., Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30, 425-447.

- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T. & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34 (2), pp. 151-176.
- Henderson, V.W., Mack, W. & Williams, B.W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Arch. Neurol.*, 46(4), 391-394.
- Hertzog, C., & Dunlosky, J. (2011). Metacognition in later adulthood: Spared monitoring can benefit older adults' self-regulation. *Current Directions in Psychological Science*, 20, 167-173.
- Hertzog, C., & Hultsch, D. F. (2000). Metacognition in adulthood and old age. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *Handbook of Aging and Cognition* (2nd ed., pp. 417–466). Mahwah, NJ: Erlbaum
- Iachini T, Ruotolo F and Ruggiero G. The effects of familiarity and gender on spatial representation of a real environment. *J Environ Psychol* 2008;
- Iachini T, Sergi I, Ruggiero G and Gnisci A. Gender differences in object location memory in a real three-dimensional environment. *Brain Cogn* 59(1): 52-59 (2005).
- Iachini, T., Iavarone, A., Senese, V.P., Ruotolo, F., Ruggiero, G. (2009). Visuospatial memory in healthy elderly, AD and MCI: A review. *Current Aging Science*, 2 (1), pp. 43-59.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G. & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196 (2), 187-191.
- Jansen, P., Schmelter, A., & Heil, M. (2010). Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Experimental Psychology*, 57 (1), pp. 54-60.
- Kalova, E., Vlcek, K., Jarolimova, E., Bures, J., (2005). Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: corresponding results in real space tests and computer tests. *Behavioural Brain Research*, 159, 175-189.
- Kashiwa, Y., Kitabayashi, Y., Narumoto, J., Nakamura, K., Ueda, H., Fukui, K. (2005). Anosognosia in Alzheimer's disease : Association with patient characteristics, psychiatric symptoms and cognitive deficits. *Psychiatry & Clinical Neurosciences*, 59(6), 697-704.

- Kavcic,V., Fernandez,R., Logan,D. & Duffy,C.J. (2006). Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain*, 129(3), 736-746.
- Kennedy, R.S., Berbaum, K.S., Drexler, J. (1994). Methodological and measurement issues for the identification of engineering features contributing to virtual reality sickness. Paper presented at: Image 7 Conference.
- Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychology of Aging*, 6 (1), pp. 10-18.
- Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, 2, pp. 117-134.
- Krauss, I. K. (1989). Testing cognitive skills with playing cards. In J. D. Sinott (Ed.), *Everyday problem solving: Theory and applications* (pp. 238–250). New York, NY: Praeger.
- Laczó, J., Andel, R., Vyhnálek, M., Vlček, K., Magerova, H., Varjassyova, A., Tolar, M., & Hort, J. (2010). Human analogue of the Morris water maze for testing subjects at risk of Alzheimer's disease. *Neurodegenerative Diseases*, 7, pp. 148-152.
- Lineweaver TT, Salmon DP, Bondi MW and Corey-Bloom J. (2005). Differential effects of Alzheimer's disease and Huntington's disease on the performance of mental rotation. *J Int Neuropsychol Soc* 11(1): 30-39.
- Lipman, P. D. (1991). Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information *Psychology and Aging*, 6, pp. 128-133.
- Liu, I., Levy, R. M., Barton, J. J. S., Iria, G. (2011). Age and gender differences in various topographical orientation strategies, *Brain Research*, 1410, pp. 112-119.
- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 181–248). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lorenz, C. A., & Neisser, U. (1986). Ecological and psychometric dimensions of spatial ability (Rep. No. 10). Emory Cognition Project, Atlanta, GA7 Emory University.
- Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E., Moffat, S.D., 2009. Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research* 205, 88–95.

- Mattis, S. (1988). *Dementia Rating Scale Professional Manual* Psychological Assessment Resources, Odessa, FL .
- McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86, 889–918.
- McKhann, G. Drachman, D., Folstein, M. Katzman, R., Price, D. , Stadlan, E.M. (1984). "Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: report of the NINCDS-ADRDA Work Group under the auspices of Department of Health and Human Services Task Force on Alzheimer's Disease," *Neurology*, vol. 34, no. 7, pp. 939-944, 1984.
- McNair D, & Kahn R. (1983). Self-assessment of cognitive deficits. In: Crook T, Ferris S, Bartus R, eds. *Assessment in Geriatric Psychopharmacology*. New Canaan, Conn: Mark Powley and Associates; pp. 137-143.
- McShane,R., Gedling,K., Keene,J., Fairburn,C., Jacoby,R. & Hope,T. (1998). Getting lost in dementia: a longitudinal study of a behavioral symptom. *Int.Psychogeriatr.*, 10(3), 253-260.
- Meulenbroek, O., Petersson, K.M., Voermans, N., Weber, B., Fernández, G.n., (2004). Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage* 22, 1503–1514.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22 (5), pp. 787-796.
- Moffat, S.D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychology Review*, 19 (4), pp. 478-489.
- Moffat, S.D., Elkins, W., Resnick, S.M., (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging* 27, 965–972.
- Moffat, S.D., Kennedy, K.M., Rodrigue, K.M., Raz, N., 2007. Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17, 1274–1282.
- Moffat, S.D., Resnick, S.M., (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience* 116, 851–859.

- Monacelli, A.M., Cushman, L.A., Kavcic, V. & Duffy, C.J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's disease: the remembrance of things passed. *Neurology*, 61(11), 1491-1497.
- Montello, D. R., & Pick, H. L. (1993). Integrating knowledge of vertically-aligned large-scale spaces. *Environment and Behavior*, 25, 457-484.
- Newman, M.C., Kaszniak, A.W., (2000). Spatial memory and aging: performance on a human analog of the Morris water maze. *Neuropsychology, Development, and Cognition: Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition* 7, 86–93.
- Pai, M.C. & Jacobs, W.J. (2004). Topographical disorientation in community-residing patients with Alzheimer's disease. *Int J Geriatr Psychiatry*, 19(3), 250-255.
- Pearson, J. L., & Ialongo, N. S. (1986). The relationship between spatial ability and environmental knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, 6(4), 299–304.
- Plancher G, Nicolas S., Piolino P., (2008). Contribution of virtual reality for neuropsychology of memory : study in ageing, *Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillessement* ; 6(1):7-22
- Plancher, G, Tirard, A, Gyselinck V, Nicolas, S., Piolino P. (2012). Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: Influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia*, (in press).
- Rainville, C., Passini, R., & Marchand, N. (2001). A multiple case study of wayfinding in dementia of the Alzheimer type: Decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 8 (1), pp. 54-71.
- Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.
- Rodgers, M.K., Sindone, J.A.3rd., Moffat, S.D., (2010). Effects of age on navigation strategy. *Neurobiology of Aging* [Epub ahead of print].
- Ruggiero, G., Sergi, I., Iachini, T., 2008. Gender differences in remembering and inferring spatial distances. *Memory* (Hove, England) 16, 821–835.
- Sholl, M.J. (1988) The relationship between sense of direction and mental geographic updating. *Intelligence* 12, 299–314.

- Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychology and Aging*, 7 (3), pp. 389-394.
- Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., & Jacobs, W. J. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22, 157–175.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Déjos, M., Arvind-Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Gross, C., N’Kaoua, B. (2012) Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performance using a virtual reality application. *Aging, Neuropsychology & Cognition*. (sous presses)
- Toepper M, Beblo T, Thomas C and Driessen M. Early detection of Alzheimer’s disease: a new working memory paradigm. *Int J Geriatr Psychiatry* 23(3): 272-278 (2008).
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and motor skills*, 47(2), 599-604.
- Vlcek, K. (2011). Spatial Navigation Impairment in Healthy Aging and Alzheimer’s Disease, In de la Monte, S (Eds) *The Clinical Spectrum of Alzheimer’s Disease -The Charge Toward Comprehensive Diagnostic and Therapeutic Strategies*, pp. 75-100.
- Volz-Sidiropoulou, E., Gauggel, S. (2012). Do Subjective Measures of Attention and Memory Predict Actual Performance? *Metacognition in Older Couples*. *Psychology and Aging*, 27(2), 440-450.
- Waller, D., Hunt, E. et Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129-143.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N’Kaoua, B. (2011). Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 14, 417–423.
- Wallet, G., Sauzeon, H., Rodrigues, J. et N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and

subject's strategy on the exploration mode, *Journal of Virtual Reality and Broadcasting* 6, no. 4, February 2009.

- Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. New York, NY: Psychological Corporation.
 - Wechsler, D. (2001). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition*. ECPA.
 - Wilkniss, S. M., Korol, D. L., Gold, P. E., Jones, M. G., & Manning, C. A. (1997). Age-related differences in an ecologically based study of route learning. *Psychology and Aging*, 12 (2), pp. 372-375.
 - 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.
-

Figures

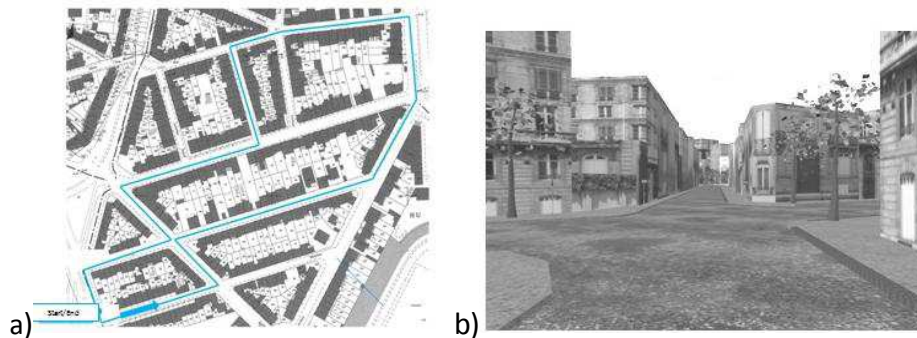


Figure 1: a) map of route learned by subjects, b) example of views of VE

Tables

	YNC group	ONC group	AD group	ANOVA / t-Student
N (M/F)	10/10	7/11	8/7	
Age (SD)	22.9 (3.55)	72.72 (8.12)	78.0 (7.60)	F(2, 50)=395.83 ; p<.0001 YNC/ONC : p<.0001 YNC/AD : p<.0001
Educational level	13.70 (1.90)	15.69 (3.23)	11.33 (4.69)	F(2, 50)=6.01 ; p<.01 ONC/AD : p<.01
Sickness score (Moffat et al. 2001)	11.60 (19.75)	48.39 (109.25)	13.46 (14.54)	ns
MMSE (Folstein et al. 1975)	-	29.06 (1.63)	22.47 (3.48)	t(31)=51.29 ; p<.0001
Mattis (Mattis, 1988)	-	138.06 (6.53)	122.73 (9.90)	t(31)=28.38 ; p<.0001
Visual recognition of Benton (Benton, 1965)	14.35 (.99)	13.22 (1.56)	9.00 (2.10)	F(2, 50)=53.73 ; p<.0001 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.0001
Visual spatial memory span (Wechsler, 1997)	8.80 (1.80)	7.83 (1.62)	5.60 (2.35)	F(2, 50)=12.24 ; p<.0001 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.01
Backward visual spatial memory span (Wechsler, 1997)	8.60 (1.60)	6.94 (1.86)	4.20 (2.04)	F(2, 50)=35.27 ; p<.0001 YNC/ONC : p<.05 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.001
TMT-B (seconds) (Reitan, 1986)	33.85 (11.65)	104.30 (79.53)	260.29 (167.41)	F(2, 50)=25.06 ; p<.0001 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.001
Wais symbol coding test (Wechsler, 1981)	85.40 (8.94)	42.111 (11.36)	18.8 (11.90)	F(2, 50)=178.369 ; p<.0001 YNC/ONC : p<.0001 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.0001
Mental rotation (Vandenberg and Kuse, 1978)	21.85 (8.24)	8.83 (6.01)	4.73 (3.26)	F(2, 50)=35.27 ; p<.0001 YNC/ONC : p<.0001 YNC/AD : p<.0001

Table 1: Subjects' characteristics; summary statistics for each group showing size, age, educational level, sickness score and neuropsychological tests.

Analysis of variance revealing the differences between the groups (:p<.05; **:p<.01; ***:p<.001)*

	YNC group	ONC group	AD group	ANOVA / t-Student
				F(2, 50)=39.76 ; p<.0001
Wayfinding errors	5.0 (6.73)	20.51 (13.96)	43.08 (16.14)	YNC/ONC : p<.01 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.0001
Wayfinding hesitations	14.23 (13.03)	26.07 (18.12)	31.80 (21.93)	F(2, 50)=4.61 ; p<.05 YNC/AD : p<.05
Picture-classification errors	48.13 (26.92)	63.89 (12.86)	78.61 (13.90)	F(2, 50)=10.44 ; p<.001 YNC/AD : p<.001
Sketch-drawing errors (A)	25.0 (19.98)	30.81 (22.30)	71.52 (26.36)	F(2, 50)=20.30 ; p<.0001 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.0001
Sketch-drawing errors (B)	31.36 (19.67)	47.98 (18.66)	80.61 (17.48)	F(2, 50)=29.96 ; p<.0001 YNC/ONC : p<.05 YNC/AD : p<.0001 ONC/AD : p<.0001
SBSOD	52.4 (17.55)	47.89 (15.40)	55.4 (15.40)	ns

Table 2: Variance analysis (ANOVA) results and subsequent tests with Scheffe procedure for VR-spatial measurements and questionnaire scores (THSD : p<.05).

		Wayfinding errors	Wayfinding hesitations	Picture-classification errors	Sketch-drawing errors (A)	Sketch-drawing errors (B)
Group effect	YNC vs. ONC	t=-4.434 ; p<.000 $\eta^2=.261$	t=-2.330 ; p<.026 $\eta^2=.145$	t=-2.261 ; p<.030 $\eta^2=.124$		ns
Neuropsychological measurements (covariables)						
Effect of the covariable on spatial measurement						
Group effect when the covariable was introduced						
	<i>Benton</i>	p<.013 ; $\eta^2=.163$	ns	ns	ns	ns
	<i>VS memory span</i>	p=.013 ; $\eta^2=.163$	ns	ns	ns	ns
	<i>Backward VS memory span</i>	ns	ns	ns	ns	ns
	<i>TMT B</i>	p<.004 ; $\eta^2=.216$	ns	ns	ns	ns
	<i>Wais symbol coding test</i>	p<.020 ; $\eta^2=.145$	ns	ns	ns	ns
	<i>Mental Rotation</i>	ns	ns	ns	ns	ns

Table.3. Covariance analysis for YNC and ONC groups

Group effect		Wayfinding errors	Wayfinding hesitations	Picture-classification errors	Sketch-drawing errors (A)	Sketch-drawing errors (B)
ONC vs. AD		t=-4.308; p<.000 η²=.374	ns	t=-3.157; p<.005 η²=.243	t=-4.808; ; p<.0001 η²=.427	t=-4.308; p<.000 η²=.374
Neuropsychological measurements (covariables)						
Effect of the covariable on spatial measurement						
Group effect when the covariable was introduced						
<i>Benton</i>	p<.008 ; η²=.220	ns	ns	ns	ns	ns
<i>VS memory span</i>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Backward VS memory span</i>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>TMT B</i>	ns	ns	p<.013 ; η²=.188	ns	ns	ns
<i>Wais symbol coding test</i>	p<.02 ; η²=.174	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Mental Rotation</i>	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Table.4. Covariance analysis for ONC and AD groups