



**HAL**  
open science

# Approche écologique de la mémoire épisodique dans le vieillissement normal et les neuropathologies

Prashant Arvind Pala

► **To cite this version:**

Prashant Arvind Pala. Approche écologique de la mémoire épisodique dans le vieillissement normal et les neuropathologies. Psychologie. Université Victor Segalen - Bordeaux II, 2013. Français. NNT : . tel-00920530

**HAL Id: tel-00920530**

**<https://theses.hal.science/tel-00920530>**

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

pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sociétés, Politique et Santé Publique

Option : Sciences Cognitives et Ergonomie

Spécialité : Sciences Cognitives

---

---

APPROCHE ECOLOGIQUE DE L'ÉVALUATION DE LA  
MEMOIRE EPISODIQUE DANS LE VIEILLISSEMENT  
NORMAL ET LES NEUROPATHOLOGIES

---

---

Présentée et soutenue publiquement le 18 décembre 2013

Par **PRASHANT ARVIND PALA**

Née le 28.11.1983 à Antananarivo, Madagascar

Devant le jury composé de :

**Mme Béatrice DESGRANCES**

Professeur, Directrice de recherche, Laboratoire de Neuropsychologie, Unité Inserm 1077,

Université de Caen, Basse Normandie ..... Rapporteur

**M. Pierre FEYEREISEN**

Professeur, Psychological Science Research Institute,

Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgique ..... Rapporteur

**M. Jean-Michel MAZAUX**

Professeur, Praticien Hospitalier, Service de Médecine Physique et de Réadaptation,

Université de Bordeaux Segalen ..... Examineur

**M. Martin HACHET**

CR-HDR

Université de Bordeaux 1 - INRIA ..... Examineur

**M. Bernard N'KAOUA**

Professeur, Université Bordeaux Segalen ..... Dir. de Thèse

**Mme Hélène SAUZEON**

Maître de conférence-HDR, Université Bordeaux Segalen, Inria, Equipe Phoenix ..... Dir. de Thèse

A ce jour, nous savons peu de choses sur la manière dont la mémoire épisodique quotidienne, visuellement riche et complexe en termes d'éléments contextuels, est affectée par le vieillissement normal contrairement aux connaissances acquises dans le domaine du vieillissement sur la mémoire épisodique verbale ou visuelle au moyens des tests traditionnels ou des procédures de laboratoire comme le paradigme de rappel libres multi-essais (e.g., utilisé par le California Verbal Learning Test). La présente thèse s'est par conséquent attachée à implémenter ce paradigme traditionnel de rappels libres multi-essais d'évaluation de la mémoire épisodique au sein d'un dispositif RV simulant une visite dans un appartement, le HOMES test (Human Object Memory of Everyday Scenes test). Cette procédure permet de dériver des indices d'apprentissage, de catégorisation, d'interférence proactive, de bénéfice de la reconnaissance comparée au rappel libre, et de fausses reconnaissances. A cela, nous nous sommes intéressés aux relations entre la mémoire quotidienne et l'action à travers l'effet de navigation active.

A l'aide d'études comparatives, nous avons retrouvé le profil mnésique classiquement observé avec le test « papier-crayon », excepté pour l'interférence proactive qui n'est pas observée comme augmentée chez les participants âgés. En effet, des scores de rappel réduits, un bénéfice accru de la reconnaissance, une sensibilité augmentée aux fausses reconnaissances, et des capacités de regroupements sémantiques sont obtenus. Chez les jeunes adultes avec traumatisme crânien (*étude 1*), un profil identique est observé alors qu'un profil bien différent est obtenu auprès des patients avec maladie Alzheimer (*étude 2*) avec notamment un tableau associant des déficits plus marqués et des capacités de catégorisation altérées. Les *études 3 et 4* adressant l'effet de navigation active chez le sujet jeune et âgé, ont mis en évidence un effet bénéfique de la navigation active sur la reconnaissance chez les deux groupes de sujets. Par contre, la navigation active diminuait les fausses reconnaissances des jeunes mais augmentait celles des âgés.

Nous discutons les résultats de ces études sur la mémoire quotidienne à travers les hypothèses de déficit-item spécifique et du déclin fronto-exécutif du vieillissement normal.

*Mémoire quotidienne ; mémoire épisodique ; validité écologique ; réalité virtuelle ; vieillissement ; navigation active.*

To this day, very little is known about the way aging affects everyday episodic memory, which is a visually and contextually rich and complex memory. However, episodic memory is traditionally assessed using verbal tasks which are lacking such complexity. One of them, the California Verbal Learning Test (CVLT) uses the multi-trial free recall paradigm that we also implemented in the Human Object Memory of Everyday Scenes test using virtual reality to simulate a visit in an apartment (the HOMES test). This procedure allowed us to assess multiple memory processes such as learning, semantic clustering, proactive interference, recall versus recognition, and false recognitions. We also wanted to investigate the relationship between everyday memory and action through active navigation and its effects on each of these processes.

We showed the typical profile of older adults usually observed using traditional paper-pencil tests on most of the memory indices except for proactive interference, which was not increased. In fact, older adults showed a reduced free recall performance despite a preserved learning ability across trials, a benefit from recognition but also a higher susceptibility to false recognitions. TBI patients (study 1) showed a profile similar to that of older adults, but patients with Alzheimer disease were impaired on all of the HOMES indices (study 2). Studies 3 and 4 examined the beneficial effect of active navigation in younger and older adults' everyday memory and showed that that recognition was the measure that benefited the most in both age groups. In contrast, older adults while active navigation decreased false recognitions in younger adults, it actually increased false recognitions in older adults.

Our results on everyday memory are discussed in terms of item-specific deficit and executive deficit hypotheses in normal aging.

*Everyday memory; episodic memory; ecological validity; virtual reality; cognitive aging; active navigation.*

# REMERCIEMENTS

---

Aux membres du jury de cette thèse: merci de me faire l'immense honneur d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier mes deux co-directeurs de thèse, Bernard N'Kaoua et, particulièrement Hélène Sauzéon, qui ont accepté d'encadrer cette thèse. Merci pour toutes ces années où ils m'ont appris des choses, mais également pour tous les efforts et leur mobilisation non seulement pour mon travail mais aussi pour avoir été présent pendant les moments difficiles.

Merci à tous mes amis qui m'ont aidé et encouragé tout au long de cette thèse, à Marie, Greg, Mathieu, Flo, Clémence et, bien sûr Isa, sans qui je ne sais pas ce que je ferais si elle n'avait pas été là pour les moindres difficultés. Et un grand merci à Julien, Pierro et Camille et Déborah qui m'ont aidé à m'échapper de cette thèse quand il le fallait !

Mes remerciements vont également à Jean-Michel Mazaux et à Sophie Auriacombe sans qui je n'aurais jamais pu mener à bien mes travaux expérimentaux, ainsi qu'aux participants qui ont été généreux et gentils, et qui ont bien voulu se prêter au jeu.

Enfin, un grand merci à mes parents et à mon frère, qui ont toujours été là malgré la distance.

*Memory proper, or secondary memory as it might be styled, is the knowledge of a former state of mind after it has already once dropped from consciousness; or rather it is the knowledge of an event, or fact, of which meantime we have not been thinking, with the additional consciousness that we have thought or experienced it before. The first element which such a knowledge involves would seem to be the revival in the mind of an image or copy of the original event.*

William James<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> 1890 ; Principles of Psychology.

# TABLE DES MATIERES

<b>Résumé</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières</b>	<b>5</b>
<b>Table des illustrations</b>	<b>9</b>
Table des figures	9
Table des tableaux	10
<b>INTRODUCTION</b>	<b>12</b>
<b>PARTIE 1 : CONTEXTE THEORIQUE</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre I. Mémoire épisodique</b>	<b>16</b>
I. Définition de la mémoire épisodique	16
1. Les tests de la mémoire épisodique	18
II. Les caractéristiques de l'encodage en mémoire épisodique	21
1. Exposition répétée à l'information : processus d'apprentissage	22
2. Processus stratégiques à l'encodage	24
2.1. Les stratégies d'organisation à l'encodage	24
2.1.1. La répétition de maintien : à la source du regroupement sériel	24
2.1.2. Répétition d'élaboration : théorie des niveaux de traitement	28
2.1.3. Corrélats neuroanatomiques de la répétition	29
2.1.4. Stratégie d'organisation sémantique	31
2.1.4.1. Calcul du score de regroupement sémantique	32
2.1.4.2. Les corrélats neuroanatomiques du regroupement	34
3. Les processus associatifs durant l'encodage	36
3.1. Organisation subjective dans le rappel libre	36
3.2. L'encodage contextuel	37
3.2.1. Mémoire de la source	38
3.2.2. Bases neuroanatomiques du binding	39
3.2.3. Théories neurocognitives du binding	40
3.3. Traitement item-spécifique et traitement relationnel	42
III. Récupération en mémoire épisodique	46
1. Les mesures comportementales de la récupération	48
1.1. Le rappel libre	48
1.2. Les modèles de récupération basés sur le rappel libre	49
1.2.1. Les modèles generate-recognize	49
1.3. La reconnaissance	50
1.4. Les modèles de récupération basés sur la reconnaissance	51
1.4.1. Théorie du seuil et théorie de la détection du signal	51
1.4.2. Modèle du traitement dual de la mémoire de reconnaissance	53

1.4.3.	Mises en évidence de la dissociation recollection vs. familiarité	54
1.4.3.1.	Dissociation des tâches : tâche RI vs. RA	55
1.4.4.	Bases neuroanatomiques de la recollection et de la familiarité	58
2.	Quand la mémoire nous joue des tours	63
2.1.	Les fausses reconnaissances	64
2.1.1.	Différentes types de fausses reconnaissances	65
2.1.1.1.	Fausse reconnaissance perceptuelles et conceptuelles	66
2.1.1.2.	Le « misinformation effect » et les FR de source	67
2.1.1.3.	La théorie de l'Activation/Monitoring	68
2.1.2.	Neuropsychologie des fausses reconnaissances	70
2.2.	L'oubli dans la mémoire épisodique	73
2.2.1.	Interférence rétroactive	73
2.2.2.	Interférence proactive	75
3.	Phénoménologie de la récupération épisodique	77
3.1.	L'euphorie synergétique	77
3.2.	« retrieval attempt », « retrieval mode », and « retrieval success »	80

## **Chapitre II. Mémoire quotidienne et validité écologique** ..... **84**

I.	Qu'est-ce que la mémoire quotidienne ?	84
1.	La mémoire quotidienne du point de vue de la validité écologique	86
1.1.	L'étude de la mémoire quotidienne basée sur la véridicalité	86
1.2.	L'étude de la mémoire quotidienne basée sur la vérisimilitude	89
1.2.1.	Event Segmentation Theory	89
1.2.2.	La mémoire épisodique de l'action	92
1.3.	Les facteurs déterminant la vérisimilitude	93
II.	La réalité virtuelle : un outil au service de l'approche vérisimilaire	95
1.	Caractéristiques de la réalité virtuelle : immersion, présence, interaction	96
2.	La RV : vers une neuropsychologie de la vie quotidienne	99
2.1.	Créer des conditions réalistes...	99
2.2.	...Mais garder le contrôle expérimental	101
2.3.	L'évaluation écologique des processus cognitifs par la RV	102
3.	Etude de la mémoire par la RV	107
3.1.	La mémoire spatiale dans le contexte de l'activité de navigation	107
3.2.	Place de la mémoire spatiale dans les modèles de mémoire : approches unifiées	110
3.3.	Etude de la mémoire par la RV : mémoire des objets et mémoire spatiale	113
3.4.	L'effet de la navigation active	115

## **Chapitre III. Vieillesse, mémoire épisodique, mémoire quotidienne** ..... **125**

I.	Qu'est-ce que le vieillissement cognitif ?	125
1.	Qu'est-ce que le vieillissement au juste ?	125
2.	Théories générales du vieillissement cognitif	128
2.1.	Déclins attentionnels dans le vieillissement normal	128
2.2.	Hypothèse exécutive du vieillissement cognitif	130
2.3.	Déclin lié à la vitesse de traitement	131
II.	Vieillesse et mémoire épisodique	134
1.	Effet du vieillissement sur les processus de mémoire	134
1.1.	L'apprentissage	134
1.2.	Stratégie d'encodage : le regroupement sémantique	135
1.3.	Processus de récupération : différences entre les tâches de rappel et de reconnaissance	136
1.4.	Processus d'oubli actif : l'interférence proactive	137
1.5.	Les fausses reconnaissances	138



2.	Hypothèses explicatives du déclin mnésique avec l'âge	139
2.1.	Déclin de la mémoire de la source et/ou des mécanismes de mémoire associative	139
2.2.	Déficit du traitement item-spécifique	141
2.2.1.	Traitement item-spécifique : le rappel et la reconnaissance	141
2.2.2.	Traitement item-spécifique et fausses reconnaissances	142
2.2.3.	L'exemple de l'effet SPT	143
2.3.	Hypothèse fronto-exécutive de déclin de la mémoire épisodique	145
2.3.1.	Les méthodes corrélationnelles et médiationnelles	145
2.3.2.	Les méthodes expérimentales	146
III.	Etude du vieillissement de la mémoire quotidienne à l'aide d'applications RV	148
1.	Contraintes de l'utilisateur âgé pour l'usage de dispositifs RV	149
2.	Travaux réalisés	150
3.	Bénéfice mnésique de la navigation active dans le vieillissement	152
<b>PARTIE 2 : APPROCHE EMPIRIQUE</b>		<b>154</b>
<b>Chapitre IV. Objectifs &amp; Méthodes</b>		<b>155</b>
I.	Objectifs	155
II.	Méthodes	158
1.	Le HOMES test	158
1.1.	Matériel	158
1.2.	Procédure générale et mesures prélevées	160
<b>Chapitre V. La mémoire quotidienne dans le vieillissement et dans les neuropathologies</b>		<b>161</b>
I.	Everyday memory and its relationship to executive functioning in healthy older adults and in young patients with traumatic brain injury	161
II.	Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory	199
III.	Résumé du chapitre V.	244
<b>Chapitre VI. Effet de la navigation active et de l'âge sur la mémoire quotidienne</b>		<b>246</b>
I.	The use of virtual reality for episodic memory assessment: effects of active navigation	246
II.	Effects of age and active navigation on episodic memory processes using a virtual apartment task	257
III.	Résumé du chapitre VI	292
<b>Chapitre VII. Discussion</b>		<b>294</b>
I.	Profil mnésique dans le vieillissement normal	295
1.	Synthèse des résultats des études 1 et 2	295
2.	La mémoire quotidienne dans le vieillissement normal, le traumatisme crânien et la maladie d'Alzheimer	296
2.1.	Les effets de l'âge sur les performances mnésiques basées sur le HOMES test	296
2.2.	Approche comparative avec les performances des patients avec TC	300
2.3.	Profil mnésique distinct des âgés et des patients avec une MA	303
2.4.	Plainte mnésique subjective chez les âgés et les patients	306
3.	Conclusion	307
4.	Perspectives	308
II.	Bénéfice de la navigation active sur la mémoire quotidienne dans le vieillissement	311
1.	Synthèse des résultats des études 3 et 4	311
2.	L'effet de la navigation active sur la mémoire quotidienne	312

reconnaisances	2.1. La navigation active comme effet SPT: tâches de rappel et de	312
	2.2. La navigation active et les fausses reconnaissances	315
	2.3. Conclusion	316
	2.4. Perspectives	317
	III. Limites du travail	319
	IV. Conclusion générale	320
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>323</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>370</b>
	Annexe I. Mémoire épisodique et neuropathologies	371
	1. Recollection vs. Familiarité	371
	2. Neuropsychologie de la mémoire dans le vieillissement pathologique	377
	3. Les troubles de la mémoire épisodique dans le traumatisme crânien	385
	Annexe II. Valorisation des travaux de recherche	391
	Annexe III. Articles publiés ou soumis non présentés dans la thèse	394

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## Table des Figures

### ➤ *Chapitre I*

Figure 1 : Description du CVLT	20
Figure 2 : Courbe d'apprentissage obtenue par le CVLT	23
Figure 3 : Rappel libre en fonction du « blocage » de la liste par catégorie	36
Figure 4 : Théorie de la <i>dichotomie des domaines</i> (d'après Mayes et al., 2007)	42
Figure 5 : Modèle <i>Binding Context-Item</i> de Diana et al. (2007)	42
Figure 6 : Corrélats neuroanatomiques des traitements item-spécifiques et relationnels	45
Figure 7 : Modèle dual de reconnaissance basé sur la détection du signal à variance égale	52
Figure 8 : Complexité de la relation entre le format du test et les processus mis en jeu	57
Figure 9 : Localisation des structures du lobe temporal median	61
Figure 10 : Anatomie du cortex préfrontal chez l'être humain	63
Figure 11 : Illustration de la tâche de « recent probe » pour évaluer l'interférence proactive	77
Figure 12 : Modèle GAPS de Tulving (1983)	79

### ➤ *Chapitre II*

Figure 13 : Segmentation d'un événement	91
Figure 14 : La boucle «perception, cognition, action» passant par le monde virtuel	97
Figure 15 : Exemples d'écran-le système CAVE	98
Figure 16 : Exemples de casque-le HMD	98
Figure 17 : Exemples d'interacteurs permettant de visualiser le mouvement biologique	98
Figure 18 : Exosquelette-gant à retour de force	98
Figure 19 : Quartier virtuel de Saint-Augustin, autour du CHU	101
Figure 20 : La classe virtuelle de Rizzo et al. (2000)	104
Figure 21 : Supermarché virtuel VAP-S (Josman et al., 2009)	106
Figure 22 : Ville virtuelle utilisée pour la mémoire spatiale et épisodique	115

### ➤ *Chapitre III*

Figure 23 : Augmentation de la population de plus de 65 ans selon les pays	126
Figure 24 : Changement cognitifs liés au vieillissement, étude de Seattle (Schaie, 1996)	129

### ➤ *Chapitre IV*

Figure 25 : Capture d'écran des différentes pièces virtuelle du HOMES tests	159
-----------------------------------------------------------------------------	-----

### ➤ *Chapitre VII*

Figure 26 : Théorie neurocognitive du déficit sensoriel et cognitif (Dennis & Cabeza, 2008)	310
Figure 27 : Reactivation of motor brain areas during explicit memory for action (Nyberg et al., 2001)	314

### ➤ *Annexe*

Figure 28 : Courbe ROC distinguant le recollection de la familiarité (Sauvage, 2010)	377
--------------------------------------------------------------------------------------	-----

Figure 29 : Stades de Braak & Braak (1991) de l'évolution de la dégénéscence neurofibrillaire dans la maladie d'Alzheimer .....	379
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## Table des Tableaux

### ➤ *Chapitre 1*

Tableau 1 : Indices collectés par le CVLT (Chen et al., 2002) .....	21
Tableau 2 : Distinction entre recollection et familiarité en termes de processus .....	55
Tableau 3 : Indicateurs des traitements item-spécifiques et relationnels .....	83

## Table des Encarts

### ➤ *Chapitre 1*

Encart 1 Synthèse du chapitre I et distinction entre traitement item-spécifique et relationnel .....	83
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### ➤ *Chapitre 2*

Encart 2 : Synthèse du chapitre II .....	124
------------------------------------------	-----

### ➤ *Chapitre 3*

Encart 3 : Principe de l'analyse de médiation .....	133
Encart 4 : Résumé du chapitre III .....	153



## INTRODUCTION

La mémoire épisodique, c'est-à-dire la mémoire des faits passés vécus personnellement dans leurs contextes spatiaux et temporels (Tulving, 2002), a fait l'objet de recherches approfondies en psychologie cognitive, étayée par l'approche neuropsychologique à travers la caractérisation des troubles de la mémoire dans de nombreuses pathologies acquises ou de nature neuro-développementale. Mais un domaine particulier qui intéresse les chercheurs en neuropsychologie est le vieillissement normal, pour deux raisons principales. La première se rapporte à l'augmentation du niveau de l'espérance de vie, résultant en une population européenne de plus en plus vieillissante, phénomène avant tout démographique associé à la crainte des maladies neurodégénératives. La seconde est déterminée par les changements aussi bien physiques que psychologiques qui ont lieu au niveau individuel chez la personne âgée. Une approche classique, transversale, est d'étudier la psychologie et la neuropsychologie du vieillissement du point de vue des différences comportementales observables entre les jeunes et les âgés, et plus récemment une approche cross-populations entre les âgés et les patients souffrant de différents troubles mnésiques (e.g., Ozen, Skinner, & Fernandes, 2010 ; Stuss, Craik, Sayer, Franchi, & Alexander, 1996). Et cette approche a été particulièrement couronnée de succès dans la compréhension des mécanismes neurocognitifs liés au vieillissement, et plus particulièrement ceux qui sous-tendent les différences liés à l'âge dans le fonctionnement de la mémoire épisodique.

Cependant, les mesures traditionnelles de laboratoires ou de tests cliniques ont été fortement critiquées sur le manque de validité écologique (Neisser, 1978), tant du point de vue d'une ressemblance fonctionnelle entre le processus mnésiques évaluées par le mesures objectives et les processus tels qu'ils se mobilisent dans la vie quotidienne lors des activités complexes et instrumentales (e.g., prendre le métro, faire ses courses, conduire...) que d'une perspective statistique dans laquelle un lien entre la plainte mnésique subjective des personnes âgées et leurs performances objectives sur ces tests n'est pas toujours obtenus. L'émergence des technologies telles que la réalité virtuelle (RV) permet, dans une certaine mesure, d'apporter une réponse à ces critiques comme en témoigne la multiplication des travaux l'utilisant afin d'investiguer la mémoire au sein d'une activité complexe telle que la navigation spatiale aussi bien chez les sujets sains que chez les patients cérébro-lésés, mais aussi dans le vieillissement normal (Cherniack, 2011). En effet, sans compromettre le contrôle expérimental, les applications de la RV permettent d'implémenter des procédures d'évaluation objective des performances mnésiques au sein d'environnements 3D simulant des situations proches de celles que nous rencontrons dans notre vie quotidienne. De plus, il

est possible d'interagir avec ces environnements grâce à l'utilisation d'interfaces sensorimotrices, ce qui ouvre de nouvelles perspectives d'études concernant les liens entre la cognition et l'action (Adamovich, Fluet, Tunik, & Merians, 2009). Cependant, rares sont les travaux qui ont usé de cette technologie pour étudier les effets de l'âge dans les processus relatifs à la mémoire épisodique telle qu'elle se manifesterait dans le quotidien.

Dans ce contexte, cette thèse essaye de comprendre la manière dont la mémoire épisodique fonctionnerait dans un contexte de la vie quotidienne et notamment dans le vieillissement normal, en y intégrant une approche neuropsychologique. A cette fin, nous avons élaborer un test virtuel de mémoire quotidienne inspiré du CVLT (California Verbal Learning test, Delis et al., 2000) permettant la mesure de plusieurs mécanismes habituellement sondés en clinique de la mémoire : l'apprentissage, la stratégie d'encodage de catégorisation, l'interférence proactive, le bénéfice de la reconnaissance comparé au rappel, et enfin les fausses reconnaissances. Ce test est appelé HOMES test pour « Human Object memories from Everyday Scenes » puisqu'en effet il se propose d'évaluer la mémoire des objets en situation réaliste, c'est-à-dire lors de la visite d'un appartement virtuel.

Les plaintes mnésiques sont également un fait du vieillissement, et l'existence d'un tel fait a également été saisie dans notre travail pour explorer la valeur écologique du HOMES test.

La première partie de la présente thèse présente le contexte théorique servant l'approche empirique présentée en seconde partie. Elle est divisée en trois chapitres. Le *chapitre premier* décrit les processus mnésiques spécifiques rattachés au fonctionnement de la mémoire épisodique aussi bien du point de vue de l'encodage que de celui de la récupération tels qu'ils sont étudiés traditionnellement en laboratoire, en ayant à l'esprit une approche neuropsychologique. Le *chapitre 2* aborde le concept de mémoire quotidienne, et plus particulièrement l'étude de la mémoire épisodique telle qu'elle fonctionnerait dans la vie de tous les jours notamment grâce à l'émergence de la RV. Y est également abordé le lien de la mémoire avec l'action en tant que partie intégrante de la mémoire quotidienne. Enfin, le vieillissement normal, et plus particulièrement celui de la mémoire épisodique dans son fonctionnement quotidien est décrit dans le *troisième chapitre*, en y intégrant une approche neuropsychologique.

La seconde partie présente les objectifs, la méthode (*chapitre 4*) et les travaux expérimentaux réalisés (*chapitres 5 et 6*). Plus spécifiquement, cette partie décrit quatre études de la mémoire épisodique des objets familiers de la vie de tous les jours présentés dans un contexte d'une visite d'appartement au moyen d'un test basé sur la RV (le HOMES test). La *première* de ces études compare le profil mnésique des personnes âgées à celui des patients

jeunes traumatisés crâniens, et met l'accent sur l'implication d'un déficit exécutif/frontal commun à ces deux populations. *La seconde*, par contraste, s'attache à identifier des corrélats neuropsychologiques distinct du fonctionnement de la mémoire dans le vieillissement normal et la Maladie d'Alzheimer (MA), notamment en accord avec un dysfonctionnement médio-temporal chez les patients avec MA. Selon une approche écologique, le lien des performances objectives avec la plainte mnésique est également examiné dans ces deux études.

La relation entre la mémoire des objets et l'action (i.e., navigation active dans l'appartement comparée à une visualisation passive) est explorée dans la *troisième étude*, notamment du point de vue du bénéfice que peut apporter l'activité sensori-motrice à certains processus mnésiques. Enfin, la *dernière étude* essaye de déterminer s'il existe un bénéfice mnésique lié à l'activité sensori-motrice dans le vieillissement normal ainsi que ses corrélats neuropsychologiques en termes de fonctionnement exécutif et mnésique.

Finalement, pris dans leur ensemble, ces résultats sont discutés dans le *chapitre 7* à lumière des hypothèses théoriques du vieillissement normal de la mémoire épisodique, avec une perspective située à travers le concept de mémoire quotidienne. En particulier, deux axes de discussion sont proposés : le premier visite les hypothèses explicatives du vieillissement mnésique, et notamment celle d'un défaut des traitements item-spécifiques (Hunt, 2012 ; Smith, 2006) à travers une démarche cross-populations (jeunes adultes avec TC et âgés avec MA), et le second s'intéresse à l'interprétation des effets de l'activité sensori-motrice sur la mémoire en termes d'amélioration des traitements item-spécifiques, et ceci chez le sujet jeune, d'une part, et d'autre part chez le sujet âgé. Ce chapitre est clôturé par nos conclusions, nos limites, et nos perspectives de travail.



---

---

# PARTIE 1 : CONTEXTE THEORIQUE

---

---

# Chapitre I

## Mémoire épisodique

S'il n'est pas aisé de parler d'un concept comme celui de mémoire épisodique, celui-ci ayant fait l'objet de nombreux débats au sein de la communauté scientifique comme en témoignent les excellentes oeuvres théoriques en la matière (Conway, 2009 ; Gardiner, 2001 ; Tulving, 1982, 2002), nous tenterons néanmoins d'en proposer une approche intégrative. Pour ce faire, nous commencerons un rappel historique suivi des développements récents non seulement d'un point de vue théorique et empirique, mais également selon une perspective intégrant la psychologie et les neurosciences cognitives. Dans ce chapitre, nous parlerons principalement des propriétés de la mémoire épisodique, aussi bien du point de vue de l'encodage que de celui de la récupération. Nous finirons par introduire un concept voisin, celui de mémoire quotidienne, dont les contours théoriques restent à ce jour encore flous.

### **I. Définition de la mémoire épisodique**

La mémoire épisodique est la mémoire des événements vécus dans leurs contextes spatio-temporels et de manière subjective par une personne (Tulving, 2002). L'une des propriétés majeures de la récupération d'informations en mémoire épisodique est qu'elle nous permet une sorte de « voyage dans le temps mental », capacité appelée « chronesthésie » (Tulving, 1983 ; 2002 ; Quoidbach, Hansenn, & Mottet, 2008). Tulving défend l'idée qu'un tel « voyage », accompagné de détails vivaces d'un événement antérieurement vécu ainsi que de représentations émotionnelles est caractérisé par une forme de conscience bien particulière, qui nous permet de dire que ces événements ont été vécus par *soi* et non par quelqu'un d'autre, appelée « conscience auto-noétique » (Wheeler, Stuss, & Tulving, 1997). Le premier à avoir proposé une définition relevant à la fois d'une tentative de compréhension de la manière dont fonctionne l'esprit et d'une base théorique mais néanmoins opérationnalisable sur le plan expérimental, fut Endel Tulving (1972), bien qu'une « mémoire du passé » et son fonctionnement fut bien avant lui l'objet de nombreuses réflexions, tout d'abord en philosophie mais aussi dans des champs disciplinaires connexes tels que la neurologie et la

psychiatrie. En effet, des écrits comme ceux d'Henri Bergson (1896) témoignent de cet intérêt pour le fonctionnement de la mémoire, et aussi loin qu'on puisse remonter dans la « mémoire » de la mémoire ceux de Platon et d'Aristote indiquent que ce concept n'était pas étranger à l'Antiquité Grecque. Il est d'ailleurs étonnant de constater la modernité de la réflexion d'Aristote dans son court ouvrage intitulé *Sur la mémoire et la réminiscence* (Aristote, 1953) long à peine de 8 pages, où il affirme par exemple que tout encodage indépendamment de la modalité sensorielle implique chez le sujet la conscience d'un séquençage temporel (j'ai conscience que cet événement a eu lieu « avant » et que cet autre a eu lieu « après »), faisant d'ors et déjà échos à la dimension temporelle de la mémoire épisodique (Fortin, Agster, & Eichenbaum, 2002). Il avait également déjà conscience que le « dérangement de l'esprit » chez certaines personnes provoque une confusion entre les fantasmes et la réalité, encore une fois devançant de deux millénaires la théorie du contrôle de la source de Marcia Johnson (Johnson, Hashtroudi, & Lindsay, 1993) ! A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, on peut également voir les prémises d'un point de vue multi-système de la mémoire, par exemple dans *Matière et Mémoire* Bergson (1896) distingue la *mémoire-habitude* et la *mémoire-souvenir*, la première étant une représentation enactée, autrement dit, une mémoire servant à accomplir une action (e.g., dans diverses situations telles que jouer au piano, jardiner, etc., mettre en œuvre les apprentissages moteurs passés, et les reproduire de nouveaux lorsque ces situations se répètent) et la seconde, synonyme de conscience, tournée vers le passé et susceptible d'être volontairement évoquée. D'ailleurs nous reparlerons de la mémoire enactée dans le chapitre suivant.

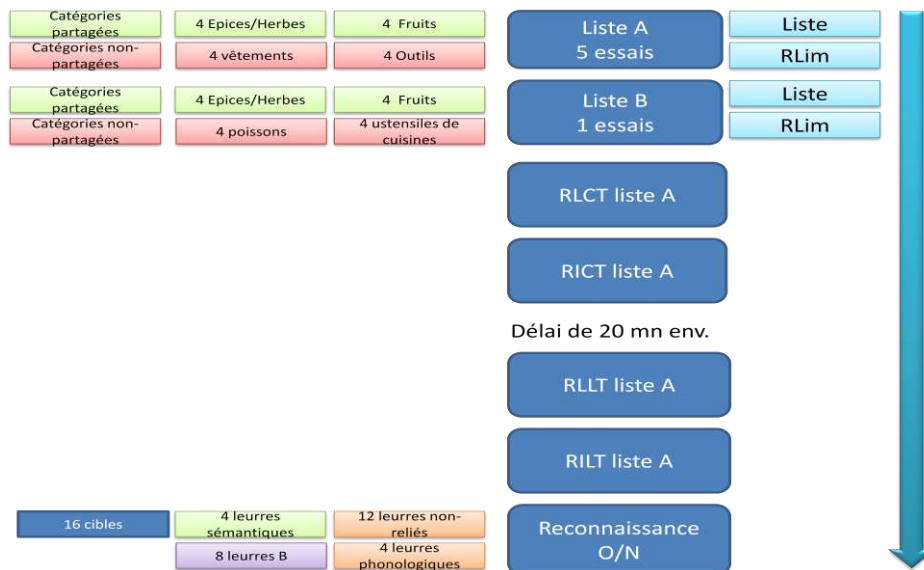
L'un des modèles influents que proposa Tulving (1995) fut le modèle Sériel, Parallèle, Indépendant (SPI). Ce modèle insiste sur les relations qui pourraient exister entre les différents systèmes de mémoire indépendants et organisés de manière hiérarchique dans l'ordre suivant : mémoire procédurale, le système de représentations perceptuelles (SRP), la mémoire sémantique, la mémoire de travail et la mémoire épisodique. Par exemple, la mémoire sémantique aurait émergé du SRP, et l'apparition de la mémoire épisodique serait rendue possible par l'existence en premier lieu de la mémoire sémantique elle-même. Ces relations s'inscrivent selon Tulving dans une perspective évolutionniste, qui décrit par exemple le fait qu'à un moment donné de l'histoire de l'humanité les hominidés ne possédaient certainement pas encore une mémoire épisodique dans sa forme complexe et complète comme nous la connaissons aujourd'hui, mais une mémoire néanmoins orientée vers le passé leur permettant de récupérer des connaissances générales, autrement dit une mémoire sémantique. Il est donc envisageable que ces hominidés ne possédaient certainement

pas de conscience auto-noétique mais une conscience noétique. Selon ce modèle, la mémoire épisodique et la conscience auto-noétique seraient des mécanismes adaptatifs récents dans l'histoire de l'homo sapiens, et peut-être constituant une caractéristique propre à l'être humain (Tulving, 2002). Par conséquent, le décours temporel au niveau ontogénétique du traitement de l'information refléterait l'évolution de ces systèmes de mémoire au niveau phylogénétique par un traitement sériel, un stockage qui serait parallèle dans chacun de ses systèmes, et enfin une récupération qui, elle, peut se faire de manière indépendante pour chacun d'entre-eux. Il existe cependant une forme de mémoire similaire à la mémoire épisodique ou « episodic-like memory » chez de nombreuses espèces animales, mise en évidence initialement en démontrant une capacité de séquençage temporel des événements chez l'animal, puis récemment en y intégrant des mesures de la mémoire du « où » et du « quoi » plus écologiques (Eacott, Easton, & Zinkivskay, 2005). La pointe des avancées en psychologie évolutionniste et en neurosciences cognitives a même permis de remettre en question non seulement l'idée d'une mémoire épisodique unique à l'espèce humaine mais également celle de sa récence au cours de l'évolution, notamment sur un point fondamental : les animaux seraient également capable d' « un voyage mental dans le temps », et par conséquent pourrait posséder une forme de conscience proche de la conscience auto-noétique (Allen & Fortin, 2013).

## 1. Les tests de la mémoire épisodique

Ebbinghaus inaugura la première étude de la mémoire d'une perspective purement expérimentale, et les chercheurs qui œuvrent à ce jour dans les sciences de la mémoire lui doivent pratiquement tout. L'apport d'Ebbinghaus à l'étude de la mémoire en psychologie a dominé les années 50 et 60, et continue d'influencer la méthode expérimentale utilisée encore de nos jours aussi bien du point de vue du matériel à apprendre, souvent de nature verbal, que de celui des mesures de performances, en termes de tâches de rappel et de reconnaissance (Wixted, 2004). Les manuels rappellent fort bien la distinction entre différentes formes de mémoire dans une perspective « multi-système » de la mémoire ; ceci n'étant pas le but de notre chapitre, nous renvoyons les lecteurs aux excellents manuels généraux et pédagogiques de psychologie cognitive tels que *la mémoire humaine* de Baddeley (1997) ou le manuel de psychologie cognitive de Sternberg (2009).

A partir de ce point, et avec l'émergence du point de vue cognitiviste dans les années 60, conjointement au développement des sciences de la communication et des premiers ordinateurs, une nouvelle définition de la cognition en termes informatiques, et plus particulièrement de celle de la mémoire fut proposée: un système qui permet l'*encodage* d'une information, de la *stocker* et de la *récupérer* au moment opportun. La mémoire épisodique s'inscrit de prime abord dans une telle approche de traitement de l'information. Dans le domaine de la neuropsychologie et des neurosciences cognitives, il fut donc tout à fait naturel d'aborder les troubles de la mémoire épisodique selon ces trois phases. Ces développements cliniques et théoriques ont également permis de mettre au point des tests de mémoire verbale tels que le California Verbal Learning Test (CVLT, Delis, Kramer, Kaplan, & Ober, 1988, 2000 ; adapté en français par Poitrenaud, Deweer, Kalafat, & Van der Linder, 2008), qui s'est inspiré, avec quelques améliorations, du Rey Auditory Verbal Learning Test (RAVLT, Rey, 1964) ou le Selective Reminding Test (Grober & Buschke, 1987). Des équivalents existent aussi lorsqu'il s'agit d'évaluer la mémoire visuelle ou visuo-spatiale, tels que le sous-test de reproduction visuelle I et II de l'échelle de mémoire de Wechsler (Wechsler Memory Scale-Revised, WMS-R, Wechsler, 1997), le Brief-Visuospatial Memory Test-Revised inspiré du précédent (BVMT, Benedict, Schertlen, Groninger, Dobraski, & Shprtiz, 1996) ou encore le Recognition Memory Test (Warrington, 1984). Ils sont peu nombreux comme on peut le constater comparés aux tests de mémoire verbale (pour une liste exhaustive des tests de mémoire et de leurs données normatives, voire des ouvrages de références tels que le *Neuropsychological Assessment* de Lezak, Howieson, & Loring, 2004 ; ou encore *A Compendium of Neuropsychological Test* de Spreen, Sherman, & Strauss, 2006). Cependant, la procédure générale d'administration reste globalement similaire pour tous ces tests, comprenant une phase d'apprentissage en plusieurs essais (un essai comprenant un couple « liste-rappel »), et constituant le paradigme d'apprentissage de listes en plusieurs essais de rappel libres (*multi-trial free recall list learning paradigm*, Wixted, 2004), parfois comprenant une seconde liste, puis des rappels libres et/ou indicés et se terminant enfin par une tâche de reconnaissance. La procédure d'administration du CVLT est décrite dans la Figure 1.



**Figure 1.** Description du CVLT. RLim = rappel libre immédiat ; RLCT= rappel libre à court terme ; RICT= rappel indicé à court terme ; RLLT= rappel libre à long terme ; RILT= rappel indicé à long terme. Les principales étapes du test sont indiquées par les boîtes bleues et la flèche bleu indique le déroulement temporel de la procédure d'administration, c'est-à-dire l'ordre de ces principales étapes. Le clinicien ou l'expérimentaliste lit la liste de course de lundi ou liste A et un rappel libre suit immédiatement chacune des 5 présentations. Immédiatement après le 5 RLim, la liste B est présentée, suivi d'un RLim. Ces deux listes A et B sont constituées de 16 mots répartis équitablement répartis en 4 catégories dont deux sont partagées par les deux listes (boîtes vertes) et deux sont spécifiques (ou non-partagées) à chacune des deux listes (boîtes roses). Le couple présentation liste A-RLim permet d'avoir une mesure de la capacité d'apprentissage ; Au cours de ces 5 essais de RLim, on peut également mesurer les capacités d'organisation sérielle et sémantique ; la comparaison de du RLim de la liste A avec celui de la liste B permet d'avoir un indice d'interférence proactive, tandis que le contraste entre le RLim liste B et le RLCT liste A permet d'avoir une mesure de l'interférence rétroactive. Après le délai de 20 mn, la mesure du RLLT permet d'avoir une mesure de la capacité de consolidation. Une mesure de la mise en place d'une stratégie de récupération est de comparer soit l'essai 5 du RLim liste A soit le RLLT liste A avec la mesure de reconnaissance correcte. La tâche de reconnaissance permet donc de recueillir bien évidemment une mesure de reconnaissance correcte, mais également de connaître la proportion de fausses reconnaissances correspondant à chacune des 4 formes de leurres.

Cette procédure spécifique nous permet, ainsi que le montre la figure, de recueillir des mesures de plusieurs processus mnésiques, les uns caractérisant l'encodage, les autres la récupération, et d'autres la stockage ou la consolidation (Delis et al., 2000). Cependant, on peut aller jusqu'à mesurer pas moins de 26 processus mnésiques (voire Tableau 1 pour la liste non-exhaustive des mesures et indices recueillis sur le CVLT, Chen et al., 2002) parfois redondant, parfois reliés à un même mode de fonctionnement cognitif. Par exemple, dans le CVLT, la capacité de discrimination est indiquée par un indice quantitatif basé sur la théorie de la détection du signal, la *recognition discriminability index*, renseignant à quel point le sujet est capable de reconnaître les cibles parmi les distracteurs, mais la comparaison des bonnes et des fausses reconnaissances nous donnent exactement la même appréciation au niveau des processus sous-jacent aux distorsions de la mémoire (Fine, Delis et al., 2008). Leur utilité pour constituer des profils mnésiques des patients souffrant de neuropathologies

d'étiologies différentes est indiscutable. Le présent chapitre est organisé en fonction des principales phases du fonctionnement de la mémoire. Il abordera donc les principaux processus mnésiques qui sont recueillis au moyen du CVLT, notamment ceux qui sont compris en tant que caractéristiques de la phase d'encodage tels que l'apprentissage et la capacité d'organisation, puis ceux qui sont considérés comme appartenant à la phase de récupération. La récupération sera plus spécifiquement divisée en processus mnésiques indiquant la précision du souvenir épisodique tels que le rappel et la reconnaissance et indiquant les erreurs de mémoires tels que l'oubli (l'interférence) et les fausses reconnaissances. En dernier lieu, les bases phénoménologiques de la récupération seront discutées.

**Tableau 1.** Indices recueillis par le CVLT en fonction de la présence ou de l'absence de l'allèle E4 et des antécédents familiaux chez les personnes âgées (Chen et al., 2002).

Variable	No E4 Alleles (n = 81)	≥1 E4 Allele (n = 72)	FH – (n = 87)	FH + (n = 66)
Age, years, mean ± SD	68.29 ± 6.85	65.20 ± 7.09	66.98 ± 7.01	64.18 ± 6.61*
Male/Female	38/43	39/33	45/42	32/34
CVLT measures, mean ± SD				
Recall measures (number correct)				
List A trials 1–5 total	49.38 ± 11.58	48.81 ± 9.82	49.26 ± 11.72	48.91 ± 9.41
List A trial 1	7.01 ± 1.96	6.69 ± 1.66	6.84 ± 2.13	6.89 ± 1.34
List A trial 5	11.60 ± 2.73	11.49 ± 2.33	11.70 ± 2.62	11.36 ± 2.44
List B	6.84 ± 2.47	6.15 ± 1.97	6.92 ± 2.48	5.98 ± 1.84*
List A short-delay free recall	9.93 ± 3.19	9.75 ± 2.77	9.99 ± 3.01	9.65 ± 2.99
List A short-delay cued recall	11.21 ± 2.80	11.00 ± 2.51	11.16 ± 2.73	11.05 ± 2.59
List A long-delay free recall	10.37 ± 3.11	10.31 ± 2.89	10.34 ± 2.96	10.33 ± 3.08
List A long-delay cued recall	11.01 ± 2.85	10.81 ± 2.61	10.90 ± 2.80	10.94 ± 2.67
Learning characteristics, List A trials 1–5				
Semantic cluster ratio (observed/expected)	2.24 ± 0.94	2.08 ± 0.87	2.24 ± 0.89	2.06 ± 0.92
Serial cluster ratio (observed/expected)	1.94 ± 1.51	2.15 ± 1.98	2.01 ± 1.76	2.07 ± 1.73
% correct recall from primacy region	29.86 ± 5.58	30.08 ± 6.41	30.51 ± 6.35	29.25 ± 5.37
% correct recall from middle region	41.62 ± 7.08	41.37 ± 8.65	41.49 ± 7.69	41.51 ± 8.06
% correct recall from recency region	28.54 ± 6.37	28.51 ± 6.26	27.97 ± 5.74	29.28 ± 6.96
Slope (increments in words recalled per trial)	1.08 ± 0.55	1.09 ± 0.54	1.12 ± 0.51	1.05 ± 0.60
% recall consistency across trials 1–5	79.64 ± 11.79	80.75 ± 10.75	80.66 ± 11.13	79.49 ± 11.55
Recall errors, Lists A and B				
Perseverations (free and cued recall total)	5.52 ± 4.95	5.82 ± 4.98	5.23 ± 4.50	6.23 ± 5.48
Free recall intrusions (total)	2.23 ± 2.35	2.45 ± 2.61	2.33 ± 2.66	2.34 ± 2.22
Cued recall intrusions (total)	2.15 ± 2.81	1.89 ± 1.80	2.30 ± 2.74	1.66 ± 1.78
Intrusions (free and cued recall total)	4.38 ± 4.33	4.34 ± 3.87	4.63 ± 4.61	4.00 ± 3.30
Recognition measures				
Recognition hits	14.58 ± 1.66	14.49 ± 1.91	14.39 ± 1.73	14.73 ± 1.84
Discriminability	93.35 ± 5.66	92.35 ± 8.43	92.83 ± 6.56	92.95 ± 7.81
False positives	1.49 ± 1.73	1.87 ± 3.06	1.54 ± 1.90	1.84 ± 3.04
	0.01 ± 0.32	0.01 ± 0.37	–0.01 ± 0.32	0.04 ± 0.37
Contrast measures				
List B compared with List A, trial 1 (% change)	–6.08 ± 30.75	–7.77 ± 27.43	–3.71 ± 28.30	–11.07 ± 29.99
Short-delay free recall vs. List A, trial 5 (% change)	–16.64 ± 19.66	–15.54 ± 17.38	–16.20 ± 17.60	–16.02 ± 19.96
Long-delay free recall vs. short-delay free recall (% change)	11.02 ± 43.21	6.67 ± 22.66	6.70 ± 22.95	12.05 ± 46.72
Recognition hits vs. long-delay free recall (% change)	57.02 ± 49.96	59.29 ± 89.38	54.51 ± 50.89	62.96 ± 91.83

\*FH– vs. FH+,  $P < 0.05$ .

## II. Les caractéristiques de l'encodage en mémoire épisodique

L'encodage se réfère généralement aux processus par lesquels les stimuli sensoriels seront traités afin d'être transformés en représentations susceptibles d'être stockées dans la mémoire. Selon Tulving (1983), l'encodage est un processus transformant un événement en trace mnésique. Avant l'émergence des techniques de neuroimagerie ayant permis l'études

des bases neuroanatomiques du processus d'encodage, celui-ci est avant tout étudié, compte tenu de sa définition, en manipulant non seulement la nature des stimuli (verbale, imagée), la modalité sensorielle (auditive, visuelle, etc.), le temps de présentation, la qualité du stimulus à différent niveau (perceptuel, conceptuel), mais aussi dans une perspective plus intuitive et empruntée à la vie quotidienne la manière dont les individus mettent en place des stratégies pour mieux apprendre, et donc mieux retenir, une information. Nous avons par exemple tous déjà fait l'expérience, en tant qu'élève écolier ou étudiant, d'apprendre des cours par cœur en les récitant à haute voix ou mentalement, utilisant spontanément une technique telle que la répétition. La répétition se présente sous deux formes principales, soit elle consiste à être exposée au stimulus de manière répétitive, indépendamment de la manière dont cette information est traitée (par exemple par l'expérimentateur), soit à répéter cette information verbalement en dehors de sa présence physique.

### **1. Exposition répétée à l'information : processus d'apprentissage**

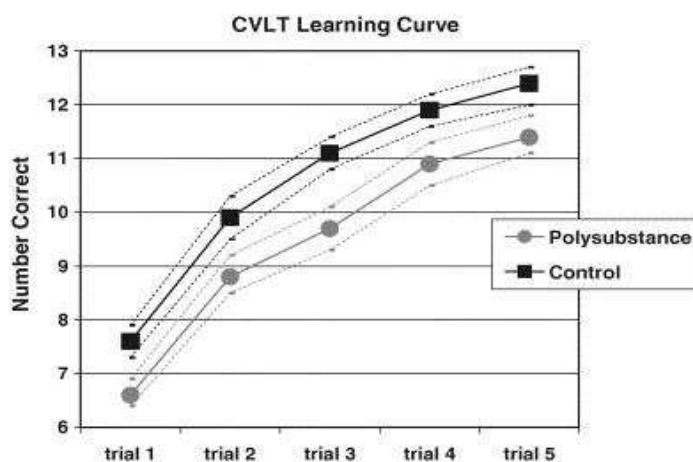
L'exposition répétée au stimulus avait permis à Ebbinghaus (1885/2011) de découvrir un phénomène important pour les études ultérieures de la mémoire : l'effet d'apprentissage. L'apprentissage, conçu comme une augmentation progressive des performances en mémoire, est directement fonction du nombre de fois qu'un individu a été exposé au stimulus (Ward, 1937), mais fondamentalement il s'agit de l'acquisition d'une nouvelle information. Généralement, l'apprentissage a été mesuré à travers le paradigme de rappel libre multi-essais (« multi-trial free recall paradigm » en anglais), dans lequel la présentation de la liste d'items à apprendre est suivie d'un rappel libre immédiat. Le nombre d'essai peut varier selon le nombre de mots à apprendre (Grenfell-Essam & Ward, 2012), mais aussi selon les caractéristiques intrinsèques des mots comme leur fréquence d'apparition dans une langue (Gregg, Montgomery, & Castano, 1980). Dans un tel paradigme, on s'attend à ce que les performances du participant augmentent d'un essai au suivant, donnant lieu à une magnifique « courbe d'apprentissage », que l'on doit également à Ebbinghaus (voire Figure 2). Il est évident que dans ce paradigme, ce qu'on mesure est la probabilité de rappel correct (ou le nombre ou le pourcentage de mots correctement rappelés au cours des essais).

Traditionnellement, l'ordre des items présentés dans la liste est randomisé à chaque essai, mais dans une étude Waugh (1961) démontra que les performances étaient similaires que les items soient gardés constants à chaque essais ou randomisés, donnant lieu à un pattern



d'apprentissage identique. Cependant, Jung & Skeebo (1967), répliquant la procédure de Waugh montrèrent que le fait de garder l'ordre de présentation des items constant au cours des essais aboutissait à une vitesse d'apprentissage meilleure que dans la condition où les items sont randomisés à chaque essai. C'est peut-être la raison pour laquelle, lorsque des tests de mémoire furent développés dans le but d'évaluer de nombreux processus faisant partie intégrante du fonctionnement de la mémoire en générale, et de la mémoire épisodique en particulier, ce paradigme de « multi-trial free recall » fut adopté avec ce changement par rapport à la considération traditionnelle quant à l'ordre de présentation des items (i.e., le CVLT).

Un test comme le CVLT évalue le processus d'apprentissage en tout premier lieu. La procédure générale de ces types de tests d'apprentissage verbal s'inspire directement des recherches menées en laboratoire. Ainsi, le CVLT comprend une première étape d'apprentissage en 5 essais successifs (voire Fig.1) d'une première liste de mots (la liste de « lundi ») alternant chacun une phase d'étude (présentation de la liste de mot) et une phase test (rappel libre immédiat), incorporant de cette manière le paradigme « mutli-trial free recall » au sein d'une procédure standardisée. Celle-ci est par conséquent prête à être utilisée par une large gamme de corps professionnels de la santé, œuvrant dans la recherche fondamentale et/ou clinique, tels que neuropsychologues, psychiatres, neurologues, et chercheurs en neurosciences cognitives de manière générale.



**Figure 2.** Courbe d'apprentissage obtenu par le CVLT, administré aux contrôles et aux participants présentant une addiction à plusieurs substances (Medina, Shear, & Schafer, 2006).

Alors que de telles données sont connues depuis le début des recherches sur la mémoire, les chercheurs ne se sont intéressés aux mécanismes gouvernant ce type d'apprentissage, décrivant typiquement les phases précoces d'encodage en mémoire

épisode, que très récemment. En effet, ce n'est que l'étude interne des « outputs » (ou de la réponse verbale) qui permet de comprendre en partie la raison pour laquelle de plus en plus de mots sont rappelés d'un essai à l'autre. L'une des hypothèses qui a été émise est que les sujets contrôlent le souvenir de ce qui a été déjà rappelé (Gardiner & Klee, 1976), permettant d'avoir une *constance* dans le rappel des items d'un essai à l'autre (Wallace, 1970). Deux autres hypothèses, populaires dans ces années, concernaient chacune les stratégies que les sujets mettent en place pour mieux retenir les items. La première hypothèse fut qu'en dépit d'une présentation extérieure des items sous forme de liste, les participants répètent mentalement les items, expliquant certaines caractéristiques intrinsèques de la courbe d'apprentissage telle que l'effet de la position sérielle (Brodie & Prytulak, 1975). La seconde fut que les individus mettent en place des stratégies d'organisation du matériel à apprendre (Tulving & Pearlstone, 1966).

## **2. Processus stratégiques à l'encodage**

### *2.1. Les stratégies d'organisation à l'encodage*

Organiser les items à apprendre selon leur position dans la liste est ce que Tulving nomme une « organisation primaire » tandis que les deux autres formes que nous allons bientôt décrire, à savoir l'organisation sémantique et l'organisation subjective sont ce qu'il nomme des formes d'« organisation secondaire » (Tulving, 1968). Ainsi, l'organisation primaire est une stratégie basée uniquement sur le traitement que le sujet effectue sur les mots à apprendre tels qu'ils sont présentés mais ne reflètent ni ne déterminent l'apprentissage en soi, tandis que l'organisation secondaire est, quant à elle, basée sur un traitement impliquant les expériences passées du participant qu'elles soient de nature épisodique ou sémantique et a un rôle déterminant dans les performances de rappel libre, donc dans le processus d'apprentissage.

#### **2.1.1. La répétition de maintien: stratégie à la source du regroupement sériel**

La répétition de manière générale peut tout à fait être explicite dans le sens où elle peut se faire à haute-voix, ou bien mentale, c'est-à-dire silencieuse. Il n'est pas étonnant qu'elle fut alors tout naturellement la première à laquelle Ebbinghaus ait pensé, comme nous l'avons vu précédemment. Mais elle fut également exploitée de manière exhaustive durant les années 60-70, bien plus dans le cadre du modèle traditionnel de Atkinson & Shiffrin (1968) et de la mémoire de travail de Baddeley & Hitch (1974) que dans le cadre de la mémoire à long-

terme, notamment la mémoire épisodique. En effet, on peut voir la répétition typiquement comme une opération propre à la boucle phonologique (i.e, système verbal à mémoire à court-terme dans le modèle de mémoire de travail de Baddeley).

Selon la théorie traditionnelle (Atkinson & Shiffrin, 1968), la répétition permettrait de maintenir une information en mémoire à court terme (MCT), et la fréquence de la répétition directement dépendante du temps imparti pour étudier l'information servirait à son transfert en mémoire à long terme (MLT). En effet, plus les répétitions seraient nombreuses plus la probabilité de retenir l'information en MLT serait grande. Les effets de position sérielle lors des rappels d'items tels que l'effet de primauté et de récence ont été expliqués par l'utilisation de ce type d'encodage : Les premiers items (ou mots) de la liste sont mieux retenus car ils bénéficient d'une fréquence de répétitions élevée tout comme les derniers items de la liste avec la seule différence que les premiers seraient ainsi transférés dans la MLT tandis que les derniers sont encore présent dans la MCT car récents. De ce fait, en introduisant un délai dans le rappel pendant lequel l'autorépétition serait bloquée par une tâche de calcul mental on peut altérer sélectivement l'effet de récence ou primauté. C'est ce que firent Glantzer & Cunitz (1966, expérience 2). Ces auteurs montrèrent que le fait d'effectuer un calcul mental empêche l'utilisation de l'autorépétition, ce qui inhibe ainsi le stockage des items dans la MCT. De ce blocage résulte tout naturellement une disparition de l'effet de récence, laissant intact l'effet de primauté, soutenant de ce fait la dissociation des deux formes de mémoire (MLT et MCT). En 1971, Rundus fit également la démonstration, en demandant aux participants de répéter les mots à mémoriser à haute voix, que les mots de début de la liste bénéficient de plus de répétition, expliquant de ce fait l'effet de primauté. Déjà, pratiquement 40 ans plus tôt, autrement dit avant même la naissance de la psychologie cognitive et l'émergence des sciences de l'information et de la communication, l'effet de primauté avait été noté et étudié ! En effet, Welch & Burnett (1924) demandaient à leurs participants de répéter les items *pendant* leur présentation et non *après* et constatèrent que cela réduisait la fréquence des répétitions puisque la vitesse de présentation était gardée constante. Ainsi, cela affectait également la performance de rappel des premiers items de la liste, diminuant, voire supprimant l'effet de primauté. Ces résultats ont également été confirmés par Glantzer & Cunitz (1966) qui dans leur première expérience manipulaient justement cette vitesse de présentation des items (des mots). Dans cette expérience, les items étaient présentés soit à un rythme de 3s soit toutes les 2s. Ces chercheurs constatèrent ainsi qu'augmenter cette vitesse réduisait la probabilité d'utiliser efficacement la stratégie d'autorépétition, autrement dit la fréquence de l'autorépétition, et donc la probabilité d'un meilleur rappel libre des premiers

items de la liste. Rundus et ses collègues examinèrent le rôle de la répétition dans une série de travaux (Rundus & Atkinson, 1970 ; Rundus, Loftus, & Atkinson, 1970) laissant suggérer que la répétition ne serait pas un encodage spontané, auto-initié, simple. La question était de savoir ce que la répétition impliquait comme processus cognitif et des hypothèses avaient déjà été avancées à cet égard. Par exemple, Bousfield (1953) avait suggéré que l'autorépétition permettrait d'associer les items entre-eux, permettant alors à l'information d'être consolidée en MLT. Etant donné que la répétition était utilisée pour étudier son effet sur des tâches de rappel libre, la possibilité d'un lien avec la mémoire épisodique se laissait dès lors entrevoir. Rappelons que jusque là, la répétition de maintien était uniquement vue comme une stratégie d'encodage propre à la MCT. Les travaux de Dewey Rundus et de ses collègues montrèrent en effet une relation directe entre la fréquence des répétitions à haute voix et la probabilité de rappel : plus les mots étaient répétés, plus la probabilité qu'ils soient rappelés était grande. Rundus, Loftus, & Atkinson (1970) ont également démontré ce lien avec une tâche de reconnaissance différée de 3 semaines, démontrant que la répétition permet le stockage des items en MLT. Lorsque cette forme simple de répétition est utilisée lors de l'apprentissage, on parle de répétition de maintien, car l'information est maintenue uniquement par autorépétition le temps d'être récupérée pour effectuer une tâche donnée.

Tout comme une tâche de reconnaissance différée, une autre manière d'étudier le transfert d'une information en MLT est de soumettre les sujets à un test de rappel libre différé après l'apprentissage de listes de mots. Jacoby & Bartz (1972) purent démontrer que l'on donne l'occasion aux sujets d'utiliser la répétition autant qu'ils le veulent ou pas, leur rappel différé demeure toujours aussi pauvre, ce qui suggère que contrairement aux prédictions du modèle traditionnel, l'autorépétition est dans tous les cas uniquement une répétition simple de maintien qu'elle soit explicite ou bien silencieuse. Notons cependant qu'à la différence d'une tâche de reconnaissance différée de 3 semaines, le rappel différé ne l'était que de 15 secondes. Jacoby (1973) fut également amené à comparer l'effet de différents types de répétitions sur ce même rappel libre différé. Par exemple, il comparait un groupe devant utiliser la répétition explicite (ou à haute voix) durant un délai de 2 secondes séparant la présentation de chaque mot dans une liste de 20 mots séparée en 4 blocs de 5 mots avec un autre devant étudier les mots en silence durant ce délai de 2 s sans aucune instruction quant à la stratégie qu'il devait utiliser. Un groupe contrôle devait effectuer un calcul mental afin de prévenir l'utilisation de la répétition. Les auteurs ont noté la supériorité du rappel lorsque les mots étaient étudiés en silence comparé à la condition « répétition à haute voix », indiquant non seulement une

variabilité dans l'utilisation de stratégie d'encodage durant l'étude silencieuse, mais sans doute également des formes d'encodage plus élaborés que la simple répétition.

La distinction entre une simple répétition de maintien et une forme plus élaborée de cette répétition fut proposée par Craik & Lockhart (1972). Contrairement à une répétition de maintien, une répétition d'élaboration implique un traitement plus profond de l'information, amenant l'individu à utiliser diverses stratégies. Les expériences de Jacoby et de ses collègues illustrent bien cette distinction : Jacoby et Bartz (1972) montrent que si les participants sont forcés d'utiliser uniquement la répétition, l'information n'est pas transférée en MLT, et Jacoby (1973) suggèrent que lorsque le choix est laissé aux participants, ils choisiraient certainement des formes plus élaborées de répétition (et sans doute aussi d'autres stratégies d'encodage). Dans une certaine mesure, on pourrait par conséquent avancer l'idée selon laquelle, puisque Rundus et ses collègues avaient également trouvé une corrélation positive entre la fréquence de la répétition et la reconnaissance différée, les participants utilisaient une plus forme plus élaborée de répétition et ce, malgré qu'elle soit explicite (à haute voix).

Woodward, Bjork, & Jongeward (1973) décidèrent donc de comparer directement les performances de rappel et de reconnaissances en termes de bénéfice lié à la répétition. Les participants étudiaient des séries de listes de mots. Un délai variable après chaque mot présenté permettait au sujet de le répéter. Cette étude permit de montrer que la fréquence de la répétition ne permettait pas de favoriser la performance au rappel final mais plutôt celle de la tâche de reconnaissance. Compte tenu de ces résultats, il est par conséquent possible, et plus plausible, que les sujets de Rundus aient obtenus de meilleurs performances à la tâche de reconnaissance non pas parce que l'information a été transférée en MLT, mais tout simplement parce que la tâche faisait appel à la familiarité des items déjà étudiés. Cette idée « saute » à l'esprit d'autant plus que les différences de performances entre le rappel et la reconnaissance sont connues (Craik & McDowd, 1987 ; Mulhall, 1915). La corrélation entre le nombre de répétitions et la probabilité accrue de correctement reconnaître les items s'expliquerait donc par un plus grand sentiment de familiarité envers les items, d'autant plus qu'ils ont bénéficié d'une répétition à haute voix. C'est en tout cas ce que semble suggérer Gardiner, Gawlik, & Richardson-Klaven (1994). Ces auteurs avaient effectivement noté que la répétition de maintenance était influencée par les réponses « Know » données lors de la tâche de reconnaissance finale par opposition à la répétition d'élaboration, qui elle, dépendait directement des réponses « Remember ». Mais nous reviendrons sur les propriétés de la mémoire de reconnaissance ultérieurement. De manière générale, ces découvertes préfigurent l'idée que le lien entre la MLT, notamment la mémoire épisodique, et la manière dont les

informations sont apprises, c'est-à-dire encodées, va au-delà d'une simple répétition de maintien et nécessiterait des traitements plus profonds.

Bien que la répétition fut l'un des premiers centres d'intérêts dans l'étude de la mémoire et a vite montré ses limites, elle n'a pourtant pas été oubliée. En tant que comportement, elle suscite encore des interrogations. Ainsi, il a été récemment suggéré que le fait de mieux rappeler les mots très fréquents comparé à des mots rares, nommé « effet de fréquence » observé dans le rappel des mots serait en partie dû à l'utilisation de la répétition explicite. Les mots ayant une haute fréquence, et en particulier les mots présentés vers la fin de la liste, seraient en effet répétés de manière importante (Ward, Woodward, Stevens, & Stinson, 2003).

### 2.1.2. Répétition d'élaboration : théorie des niveaux de traitement

A ces travaux qui montrèrent que la répétition ne permettait pas le transfert de l'information de la MCT vers la MLT, Craik & Lockhart (1972) ont suggéré qu'il existerait d'autres formes d'encodages variant en profondeur, dont le traitement le plus profond, faisant appel aux connaissances préalables de nature sémantique déjà stockées en MLT constituerait une « répétition d'élaboration ». Dans ce même article, ils proposèrent donc que le transfert de l'information vers la MLT dépendrait de cette variabilité dans la profondeur de l'encodage. Ce qui importe donc pour une meilleure rétention, et donc une meilleure récupération de l'information en MLT, ce n'est pas la quantité du traitement (i.e., la fréquence de la répétition) mais la qualité du traitement : association des items cibles avec des images mentales, attribution de significations à ces informations, les lier, les organiser, ...etc. Ainsi le traitement plus profond, attachant plus d'importance à la signification des items à traiter serait plus facilement lié aux connaissances déjà présentes dans la mémoire sémantique, permettant leur plus grande intégration dans la MLT. L'étude la plus citée, apportant un soutien décisif à cette théorie fut celle de Craik & Tulving (1975). Dans cette étude, les participants devaient effectuer des jugements sur les mots qui leurs étaient présentés mais ne savaient pas qu'un test de mémoire leur sera administré plus tard, ce qu'on appelle un apprentissage implicite ou incident. Ils devaient par exemple décider si le mot était en majuscule ou en minuscule dans la première condition, permettant ainsi un traitement superficiel d'une caractéristique physique du mot tandis que dans la seconde condition, ils devaient décider si le mot rimait avec un mot cible ou pas, une condition d'encodage intermédiaire, portant sur un traitement phonologique du mot, et enfin la dernière condition dans laquelle ils devaient décider si le

mot appartenait à une certaine catégorie sémantique, permettant un encodage profond. Une tâche de reconnaissance ultérieure leur était administrée et montra que les mots ayant reçu l'encodage portant sur leur catégorie sémantique étaient mieux reconnus, suivis de mots ayant reçus un traitement phonologique, puis de ceux qui n'avaient bénéficié que d'un traitement structural. Il se trouve qu'à travers ce type d'étude on arrive à mesurer l'impact de différents niveaux de profondeur d'encodage sur la manière dont nous nous souvenons des événements que nous vivons dans la vie de tous les jours, dans laquelle l'encodage ne dépend pas de notre volonté.

### 2.1.3. Corrélats neuroanatomiques de la répétition

Il semblerait en outre que peu d'études se soient focalisées sur les bases neuroanatomiques de la répétition en tant que stratégie de transfert d'une information de la MCT vers la MLT. Une étude récente a repris la procédure classique dans laquelle les mots sont présentés à une certaine vitesse, ainsi permettant aux participants de procéder à des répétitions du mot qu'ils viennent juste de voir ou d'entendre avant que le mot suivant ne soit présenté (Meeuwissen, Takashima, Fernandez, & Jensen, 2011), ces auteurs ont pu manipuler le délai de rappel des mots que les participants devaient soit rappeler immédiatement (condition « mémoire de travail »), faisant référence à une répétition de maintien, soit à un délai ultérieur (condition « mémoire à long terme ») mais également contrôler la phase de présentation du mot et la phase de répétition du mot. Utilisant la magnétoencéphalographie (MEG), cette étude a montré que l'activité alpha, connue pour être impliquée dans les tâches de mémoire de travail, est également impliquée dans la formation de la MLT, particulièrement au niveau pariéto-occipital. Comme par hasard, cette activité était plus forte pour les mots ayant bénéficié d'autorépétitions et que les participants ont réussi à rappeler. Dans le même esprit, Davachi, Maril, & Wagner (2001) demandèrent à leurs participants, soit de répéter une liste de 3 mots, soit d'effectuer un traitement plus élaboré sur cette liste en rangeant ces mots selon un ordre croissant de leur désirabilité, pendant qu'ils étaient soumis à une IRMf. Une tâche de reconnaissance de type oui/non leur était administrée en suivant. Durant l'encodage, la répétition de maintien activait les régions telles que le cortex préfrontal latéral gauche, le cortex pariétal bilatéral, l'aire motrice supplémentaire ainsi que des régions du cervelet, mais également la région antérieure du cortex inféro-préfrontal gauche associée à la répétition d'élaboration. Ensemble, ces activations prédisaient la réussite à la tâche de reconnaissance ultérieure.

Alors que la théorie des niveaux de traitements n'est pas nouvelle, les bases neuroanatomiques de l'interaction entre le traitement de nature sémantique dans les tâches de rappel libre n'ont véritablement commencé à être élucidées qu'à partir de la fin des années 1990. Grâce au développement des techniques de neuroimagerie, il est également possible d'investiguer les bases neuroanatomiques des traitements selon leur profondeurs (Nyberg, 2002). En effet, il semblerait qu'un traitement de nature sémantique dans une tâche évaluant plutôt la mémoire épisodique, du moins au niveau de l'encodage, soit fortement relié à l'activité à la fois du lobe temporal médian (LTM) et du cortex préfrontal (CPF), notamment la partie antérieure de l'hippocampe gauche et de nouveau du cortex préfrontal inféroventral gauche comprenant les aires de Brodmann 45, 46, 47 et 10 (Davachi et al., 2001 ; Kapur, Craik, Tulving, Wilson, Houle, & Brown, 1994). Cependant, avant l'émergence des techniques de neuroimagerie telles que l'IRMf, Sanquist et al. (1980) ont eu l'idée d'étudier les potentiels évoqués cognitifs (ou « event-related potentials » ou ERPs en anglais) pendant que les participants devaient traiter les mots selon différents niveaux de profondeur durant la phase d'étude. Une tâche de reconnaissance de type Oui/Non est administrée durant la phase test dans laquelle les mots étudiés sont mélangés avec des mots nouveaux. L'expérimentateur différencie alors les items cibles ayant reçu une réponse « Oui » comme étant « subséquentment rappelés » (« subsequently remembered ») des items cibles omis (« subsequently forgotten »), puis regarde *a posteriori* la différence de pattern des composantes ERP entre les items « subséquentment rappelés » et « subséquentment oubliés ». Cette différence appelée différence-due-à-la-mémoire ou *Dm* (« difference-due-to-memory ») reflète donc la différence durant la récupération imputable au niveau de traitement. La plupart des études IRMf ont repris ce paradigme, afin d'étudier les corrélats neuroanatomiques des niveaux de traitement. Dans une étude qui va bientôt paraître, Schott et al. (2013) ont demandé à leurs participants d'étudier une liste de mots qu'ils devaient ensuite rappeler librement. Le traitement profond, sémantique, de ces mots aboutit naturellement à un meilleur rappel que le traitement superficiel (portant sur les caractéristiques perceptuels) et est associé à l'augmentation de la connectivité fonctionnelle entre l'hippocampe (HC) droit et le cortex préfrontal ventromédian (CPFVM) bilatéral ainsi qu'avec la jonction temporopariétale droite tandis que le traitement superficiel correspondrait à l'augmentation de la connectivité fonctionnelle entre l'HC droit et le réseau attentionnel fronto-pariétal. De plus il semblerait qu'une partie des régions impliquées dans le traitement superficiel serait également activée lorsqu'un individu est engagé dans une tâche faisant appel à un traitement plus profond (i.e., « est-ce que cet objet est vivant ? » vs. « Est-ce que le nom de cet objet commence par A ? »),



mais il n'y aurait pas des régions cérébrales spécifiques aux niveaux de traitement (Otten, Henson, & Rugg, 2001).

#### 2.1.4. Stratégie d'organisation sémantique durant l'encodage

En plus d'une organisation sérielle lors du rappel libre, l'une des hypothèses explicatives de la courbe d'apprentissage fut que les individus trouvent un moyen d'organiser les items en les associant à une signification (Tulving, 1966). L'une des controverses qui a toujours animé l'étude de la mémoire fut la distinction entre la mémoire épisodique et sémantique : est-ce deux formes de mémoire distinctes ou bien deux faces d'un même processus ou bien encore juste deux extrémités sur un continuum ? L'une ne serait-elle qu'une forme particulière de l'autre ? La distinction entre la mémoire sémantique et la mémoire épisodique fut proposée par Tulving (1972). Mais leur indépendance ne signifie pas pour autant une absence d'interaction, comme en témoigne ces stratégies d'organisation. Deux formes d'organisation ont été découvertes, d'une part l'organisation sémantique (Bousfield, 1953 ; Tulving & Pearlstone, 1966) et d'autre part, l'organisation subjective (Tulving, 1966).

En administrant une liste de 60 mots séparée en 15 blocs et comprenant 4 catégories (animaux, noms, professions, et légumes), Bousfield découvrit qu'en dépit d'une présentation randomisée des items, les participants avaient tendance à spontanément réorganiser les items lors du rappel libre en regroupant les mots appartenant à la même catégorie. Cependant, l'idée n'est pas nouvelle : en 1890, William James, puis Hilgard (1948), dans son livre *theories of learning* avaient déjà énoncé qu'un meilleur apprentissage dépendrait d'une organisation du matériel à apprendre.

Cet effet, appelé « semantic clustering » ou encore « category clustering » généra un nombre considérable de recherche (e.g., Bower, Lesgold, Tieman, 1969) et continue d'en susciter (e.g., Polyn, Norman, & Kahana, 2009). Dans cet effet de clustering sémantique, tout se passe comme si les participants font appel à leur mémoire sémantique, et notamment à l'organisation interne de la mémoire sémantique sous forme de réseau dans lequel les représentations internes seraient activées lors de l'encodage précoce des items (traitement sensoriel). Au fur et à mesure des essais, les participants n'ont plus qu'à récupérer ces représentations internes en donnant une forme extérieure à cette organisation. Dans la plupart des études sur l'organisation sémantique des items, les mots à apprendre faisaient partie de catégories sémantiques, même si celles-ci n'étaient pas « bloquées », c'est-à-dire pré-organisées. Mais les études ont montré que le phénomène de clustering était encore plus

saillant lorsque c'était le cas, autrement dit, lorsque l'expérimentateur avait rendu visible, évident l'organisation sémantique des items (Huttenlocher & Newcombe, 1976 ; Stones, 1973).

#### 2.1.4.1. Le calcul du score de regroupement sémantique

Toujours dans les années 70, de nombreuses méthodes ont également été proposées afin de mesurer le degré d'organisation sémantique des items rappelés. L'une des premières fut naturellement utilisée par Bousfield (1953) et Bousfield & Bousfield (1966) dans laquelle ces auteurs calculaient le nombre de catégorisations attendues et le déduisait du nombre de catégorisation observées. Ce dernier est généralement calculé en comptant un point à chaque fois que deux mots appartenant à une même catégorie se retrouvent à une position contigüe lors du rappel. Le nombre de catégorisations attendues était calculé selon la formule présentée ci-dessous :

$$EXP = \sum_{i=1}^4 \frac{[n_i(n_i - 1)]}{r}$$

Où  $i$  représente le type de catégorie,  $n_i$  le nombre de mots correctement rappelés pour cette catégorie et pour un essai donné  $i$ , et  $r$  le nombre total de mots rappelés de la liste pour cet essai, incluant les répétitions et les intrusions.

Cependant, la formule mathématique du calcul du nombre de catégorisation attendu doit également tenir compte du nombre de catégorisation obtenu par chance. Car tout apprentissage d'une liste de mots présentant des catégories sémantiques assume qu'au moins lors des premiers essais d'apprentissage, des mots peuvent très bien se retrouver à une position contigüe sans qu'il y ait eu de la part du participant une réelle volonté de les regrouper. A ce jour nous pouvons classer deux types de conceptions du calcul de la capacité de regroupement catégoriel des mots attendus, affectant de ce fait le calcul du regroupement catégoriel dans sa totalité : l'une prenant comme ligne de base (« baseline ») le nombre de mots rappelés par les participants, appelée « recall-based expectancy » en anglais, l'autre prenant comme baseline la liste de mots à apprendre « list-based expectancy ». La formule de Bousfield épousait la première conception, largement adoptée par les chercheurs par la suite, assumant qu'en adoptant les méthodes basées sur le rappel, on s'assurait de l'indépendance du processus de catégorisation de celui du rappel proprement dit tout en mettant en évidence le similarité de la variation dans les deux types de processus, à savoir : l'utilisation du regroupement sémantique permet d'obtenir de meilleures performances de rappel. Des tests

tels que le CVLT, que nous avons déjà mentionné, ont également adopté cette première conception à l'origine et reprend la formule de Bousfield citée précédemment ; le score de catégorisation représente la somme des tous les indices de catégorisation attendu par catégories, donnant au total un indice pour un essai. L'indice de catégorisation total est égal à la somme de tous les indices obtenus pour chaque essai.

Mais indépendamment de ce type de test, d'autres auteurs (Roenker, Thompson, & Brown, 1971) ont également proposé une autre formule largement adoptée dans les études expérimentales de catégorisation sémantique optant non pas seulement pour une soustraction entre le nombre de catégorisation attendus et observés, mais également sur un calcul de quotient prenant en compte-ajustant pour-la différence entre le nombre maximum de catégories rappelées et le nombre total des mots correctement rappelés. Cette formule, appelée « Adjusted Ratio of Clustering » est encore utilisée de nos jours (Barber & Rajaram, 2011 ; Sauzéon et al., 2012 ; Zaromb & Roediger, 2010).

$$ARC = \frac{OBS - EXP}{MAX - EXP}$$

Où *obs* est le nombre catégorisations sémantiques observées, *exp* étant le nombre de catégorisations attendues, reprenant les formules précédentes, et *max* étant le nombre maximum de catégories rappelées.

Bien que l'ARC score continue toujours à être utilisé, depuis une dizaine d'année les chercheurs œuvrant plus spécifiquement dans le domaine de la mémoire épisodique commencent à adopter la deuxième conception, à savoir la « list-based expectancy » (Stricker, Brown, Baldo, & Delis, 2002). Ces auteurs développèrent non seulement une nouvelle formule prenant en compte le calcul de la catégorisation attendue basée sur la liste, mais donna également les justifications rationnelles ainsi que la démonstration mathématique de cette nouvelle formule appelée « list-based clustering » ou LBC plus communément. Les auteurs simplifièrent au maximum le calcul et optèrent non pour un quotient mais, ce qui était plus logique, pour une différence entre la catégorisation observée et attendue. Ce choix fut selon les auteurs motivé par le fait que dans les formule de quotient, tels que l'ARC score, seul les valeurs positive reflétaient le processus de catégorisation, or les valeurs négatives pouvaient être obtenues mais impossible à interpréter. Avec le score LBC, une différence produirait des valeurs négatives qu'il est possible de prendre en compte. Ainsi les valeurs négatives au-delà de la seule chance signifieraient que les participants utiliseraient d'autres formes d'organisation que la seule organisation sémantique lors de l'encodage.

$$LBC = OBS - EXP$$

Et

$$EXP = \frac{[(r - 1)(m - 1)]}{N_L - 1}$$

Où  $r$  est le nombre de mot correctement rappelés pour un essai,  $m$  la taille de la catégorie, c'est-à-dire le nombre de membres d'une catégorie, et  $N_L$  le nombre total de mots d'une liste.

Un certain nombre de propriétés ou de conséquences découlant de cette méthode sont inventoriées dans l'article de Stricker et al. (2002) parmi lesquelles nous citerons les plus importantes d'un point de vue aussi bien méthodologique que théorique. Par exemple, le fait d'utiliser la conception « list-based expectancy » avec la nouvelle formule LBC permet 1) d'avoir un score de 0 lorsque les regroupements sont effectués uniquement par hasard, 2) le score augmente lorsque la performance de rappel des mots augmente, ce qui n'était pas forcément le cas avec les méthodes basées sur le rappel. Des méthodes tels que l'ARC score peuvent très bien mesurer la catégorisation sémantique compte tenu du nombre de mots rappelés et de catégories rappelées, cependant ces scores sont inconsistants avec les théories de l'apprentissage, et plus particulièrement le point de vue selon lequel une meilleur l'utilisation de la stratégie de regroupement conduit à un meilleur rappel : Les individus peuvent très bien ne rappeler que 3 mots sur les 16 étudiées mais si ces mots sont sémantiquement reliés entre-eux, la formule basée sur le rappel tel que l'ARC score donnera un indice de regroupement très élevé alors que la performance de rappel est faible. De même, si un individu peut faire un maximum de 3 regroupements sémantiques à l'intérieur d'une catégorie comprenant 4 exemplaires, et s'il ne rappelle que ces 4 mots, il aura un score de regroupement parfait (égale à 1 pour le ARC score) ! A l'inverse, il peut aussi arriver qu'un individu rappelle une bonne partie de la liste de mots avec un nombre important de regroupements au total reflétant la mise en place d'une stratégie et non un simple effet du hasard, mais peu de regroupements de mots concentrés (rappelés de manière consécutive) par catégorie, ce qui conduit à un score faible de regroupement.

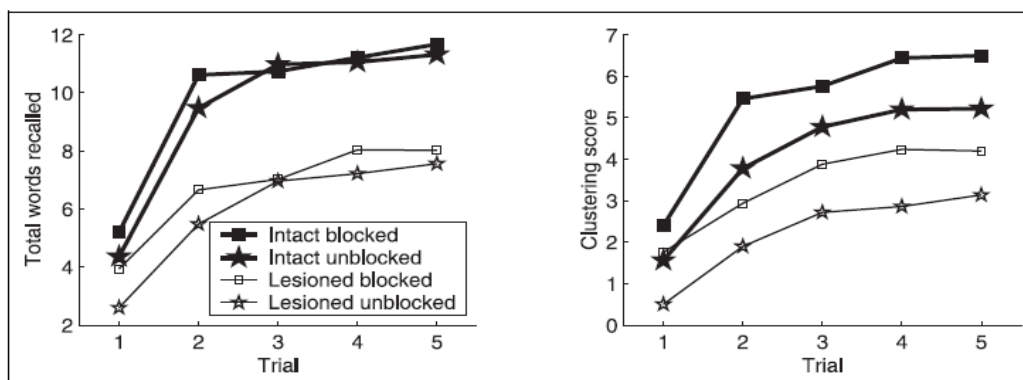
#### *2.1.4.2. Les corrélats neuroanatomiques du regroupement sémantique*

Les études lésionnelles en neuropsychologie avaient déjà démontré le rôle prépondérant du cortex préfrontal (CPF) dans l'organisation sémantique des items durant le rappel libre (Baldo, Delis, Kramer, & Shimamura, 2002 ; Gershberg & Shimamura, 1995), confirmées par des études de simulation informatique (Becker & Lim, 2003). En évaluant la mémoire épisodique verbale des patients frontaux unilatéraux gauches et droits de diverses

étiologies au moyen du CVLT, Baldo et al. (2002) ont par exemple pu montrer que leur score de regroupement sémantique, calculé en utilisant la formule basée sur la liste (LBC) de Stricker et al. (2002), étaient nettement inférieur à celui des sujets contrôles. Cependant, une amélioration de leur performance est notée lorsque la catégorisation est rendue évidente, notamment par « blocage » de la liste par catégories (Becker & Lim, 2003 ; voire figure 3) ou bien lorsqu'un indice sémantique est présenté lors du rappel libre (Hildebrandt, Brand, & Sachsenheimer, 1998). Il semblerait donc que la capacité à se servir de l'organisation sémantique soit préservée chez les patients frontaux, ce serait en fait leur utilisation spontanée qui serait affectée par les lésions. En revanche, les lésions de l'HC n'affecteraient pas la capacité de regroupement sémantique mesurée au moyen du CVLT, comme peuvent en témoigner les études lésionnelles auprès de patients ayant subi une lobectomie temporale antérieure (Berenbaum, Baxter, Seidernberg, & Hermann, 1997) ou bien chez les patients souffrant de la démence de type Alzheimer (Kramer et al., 2005).

Les confirmations du rôle du CPF dans le processus stratégique de catégorisation sont également apportées par les études de neuroimagerie fonctionnelle. Une méta-analyse récente (Binder, Desai, Graves, & Conant, 2009) regroupant 120 études de neuroimagerie fonctionnelle du traitement sémantique indique l'existence d'un vaste réseau comprenant le lobe pariétal inféro-postérieur, le gyrus temporal moyen, les gyri parahippocampique et fusiforme, le gyrus cingulaire postérieur ainsi que des régions spécifiques du CPF telles que le cortex préfrontal dorsolatéral (CPF<sub>DL</sub>), le gyrus frontal inférieur (GFI) et le CPF<sub>V</sub>M, chaque région ayant un rôle spécialisé, spécifique, dans les aspects sémantiques du traitement de l'information. Cependant, les mécanismes cérébraux aboutissant à l'utilisation de la similarité sémantique entre les items pour améliorer les performances de rappel libre durant l'apprentissage sont encore peu connus, et la recherche dans ce domaine ne fait que commencer (Long, Öztekin, & Badre, 2010 ; Manning, Sperling, Sharan, Rosenberg, & Kahana, 2012). Ainsi, dans une tâche d'apprentissage incident, Long et al. (2010) présentaient des mots dont les participants devaient juger le degré d'agrément. Les participants étaient ensuite soumis à une tâche de rappel libre ainsi que de reconnaissance de type « Oui/Non » après un délai de 2.5 mn pendant lequel ils avaient effectué une tâche distractive de calcul. La particularité de cette expérience était que d'un essai d'apprentissage à l'autre les mots étaient reliés à une catégorie sémantique ou non. En calculant le LBC, les auteurs ont montré que les mots agréables avaient plus de chance d'être catégorisés, et que les mots catégorisés étaient mieux rappelés que les mots non-catégorisés. Mais, le plus important était encore une fois la découverte de l'activation du CPF<sub>DL</sub> et du CPF<sub>V</sub>M correspondant à l'encodage des

mots catégorisés. Cependant, le CPFDL ne révélait aucune activation significative lors du rappel de ces mots catégorisés, suggérant que cette région particulière ne serait impliquée que lorsqu'un individu traite la similarité sémantique entre les items à mémoriser, et de ce fait permet de catégoriser les items *avant* qu'ils ne soient rappelés, et non lors du rappel en soi. Exemple élégant d'un effet de « mémoire subséquente » (« subsequent memory » en anglais, Sanquist et al., 1980) de plus en plus utilisé dans les études des bases neuroanatomiques de la mémoire épisodique, cette étude apporte donc un soutien conséquent à l'idée selon laquelle le processus de catégorisation (ou regroupement) sémantique intervient bien lors de l'encodage et non lors de la récupération à proprement parler.



**Figure 3.** Performances de rappel libre et de regroupement sémantique des contrôles sains et de patients présentant une lésion frontale simulés selon le « blocage » de la liste (d'après Becker & Lim, 2003).

### 3. Les processus associatifs durant l'encodage

#### 3.1. Organisation subjective dans le rappel libre

Mais regrouper les items selon leur appartenance à une catégorie sémantique n'est pas la seule manière d'organiser le matériel à apprendre. En effet, Tulving (1962, 1966) trouva que même lorsqu'une liste de mots non-reliés sémantiquement est présentée, les participants trouvent toujours un moyen d'organiser ces mots. Tulving (1962) demanda par exemple à ses étudiants d'apprendre une liste de 16 mots non reliés sémantiquement puis d'en faire un rappel libre, selon la procédure de rappel libre multi-essai, afin d'obtenir une courbe d'apprentissage. Tulving remarqua qu'en dépit d'un lien non existant entre les mots, il existait un effet de constance de rappel des mots d'un essai à l'autre dans lequel ces mots étaient rappelés dans le même ordre. Tulving fit donc l'hypothèse qu'il existait une forme d'organisation propre au sujet. Que se passe-t-il donc dans l'esprit du sujet ? Il semblerait que pour obtenir une telle constance de rappel, les sujets fasse appel à des stratégies variées pour lier les items entre eux, qui peuvent être de nature propositionnelle ou bien qui fassent appel à

l'imagerie mentale. Ainsi, « chaise » et « chien » pourraient être liés car tous les deux commencent par le son « ch » s'il s'agit d'une organisation phonologique, ou bien parce que le participant imagine un chien se tenant sur une chaise et mémorise cette image. Il n'est pas non plus exclu qu'une telle image soit facilitée par les souvenirs épisodiques antérieurs du participants, comme étant partie intégrante des événements qu'il a déjà vécus (e.g, le participant aurait vu un chien se tenant sur une chaise lors d'un numéro de cirque). Et ce fut une (re-)découverte majeure quand à la nature de la mémoire épisodique : c'est une mémoire essentiellement de nature associative.

### *3.2. L'encodage contextuel*

Durant l'encodage, les items peuvent donc s'associer de cette manière entre-eux, ou bien un aspect central de l'information peut être associé à des éléments « liés » à ce contenu. Ces éléments environnants deviennent alors le contexte dans lequel l'information centrale a été apprise, indépendants du contenu (Isarida & Isarida, 2004). En général, nous avons tendance à comprendre le concept de contexte comme étant un élément non seulement allant de paire avec le contenu, mais qui représente aussi une donnée extérieure à nous, comme en témoignent des tâches telles que le rappel indicé dans lequel un indice est fourni par l'expérimentateur ou le clinicien, permettant un meilleur rappel que lorsqu'aucun indice externe n'est fourni, comme c'est le cas pour un rappel libre ; ou encore le paradigme d'apprentissage de paire de mots dans lequel les individus doivent apprendre une paire de mots durant un certain nombre d'essais comprenant une alternance entre la présentation de la paire et la réponse du sujet lorsque le premier mot de la paire est présenté en tant qu'indice de rappel. Ce type de paradigme met bien en évidence ce que Thompson & Tulving (1973) ont appelé le principe de « spécificité d'encodage ». Selon ce principe, une meilleure performance de mémoire est obtenue si le contexte lié à l'information centrale durant l'encodage est présenté de nouveau lors de la phase de récupération. Il semblerait que ce principe soit très efficace lorsque la relation entre le contenu et le contexte est préétablie ou évidente un peu à la manière des liste de mots « bloqués » par catégorie sémantique. L'une des mesures populaire de ce type d'organisation subjective est la mesure des fréquences appariées (FA, Sternberg & Tulving, 1977), calculant le nombre de paires de mot rappelés de manière consécutifs dans une position adjacente au cours d'au moins deux tests de rappels consécutifs.

Cependant, comme le suggèrent l'étude de Tulving (1962), ce contexte peut aussi être généré par des représentations internes, qu'elles soient sémantiques (Smith & Vela, 2001) ou

épisodiques, qu'elles soient de nature verbale ou visuelle (Pointer & Bond, 1998) ou encore qu'elles fassent référence à des émotions générées lors d'expériences vécues antérieurement (Eich, 1995). Finalement, même si la définition initiale de Tulving de la mémoire épisodique considère l'information spatiale et temporelle comme étant des informations contextuelles associées à l'information centrale, ce ne sont pas les seules formes de contextes.

### 3.2.1. Mémoire de la source

Les théoriciens de la mémoire épisodique considèrent que ce qui constitue au final un épisode est le résultat d'une intégration au sein d'une même représentation cohérente à la fois des informations propres au contenu et celles relatives au contexte (Tulving, 1983 ; Johnson, Hashtroudi & Lindsay, 1993). L'une des voies possibles par lesquelles le contenu (ou l'information centrale) s'associerait à des informations contextuelles serait un processus appelé « binding » (Johnson et al., 1993). Ainsi, la banane qui a été récupérée en mémoire acquière une signification particulière pour un individu, car elle est associée à un contexte qui a été personnellement vécu par cet individu et dans lequel il a vu une banane. L'information centrale fut non seulement encodée en tant que concept « banane », mais pour correspondre à ce concept, diverses caractéristiques perceptives furent également encodées, telles que la forme du fruit, sa couleur et sa texture, toutes « liées » les unes aux autres pour former une représentation distincte de la banane. Cet objet fut, toujours par le biais du binding, lié à un contexte spatial (e.g., la banane était posée sur la table de la salle à manger, chez mon ami) et temporel (e.g., lors d'une visite chez mon ami, il était près de 22 heures, on venait juste de dîner). Selon le cadre théorique de la mémoire de la source (« Source Memory Framework »), proposé par Marcia Johnson et ses collègues (Johnson et al., 1993), ce mécanisme de binding rendrait par conséquent un épisode vécu hautement spécifique, donc distinguable d'autres épisodes vécus antérieurement ou ultérieurement, et accessible selon des étiquettes spécifiques qui constitueraient des « indices » de récupération de cet épisode, encore appelés « sources ». Ce cadre théorique brouille la distinction entre ce qu'est le contenu et le contexte, ce dernier pouvant être récupéré indépendamment du contenu. Ainsi, je peux très bien reconnaître une personne que je croise dans la rue, dont le visage me paraît familier sans pour autant pouvoir lui attribuer un contexte, et par conséquent n'avoir qu'une représentation partielle du souvenir : l'ai-je vue chez Paul, lors de sa crémaillère ? Ou l'avais-je rencontrée dans le bus il y a une semaine ? S'agit-il de Jacques ou de Pierre ? Ainsi, sommes-nous souvent en train d'attribuer une source à une information dans notre vie quotidienne. Dans cet



exemple, il s'agit d'un contenu (le visage), et deux sources possibles (localisation spatiale), à l'inverse on peut imaginer quelqu'un nous parlant au téléphone, on reconnaît la voix sans pour autant pouvoir y associer un visage : cette voix, est-elle celle de Jacques ou de Pierre ? Ainsi, la théorie de la mémoire de la source prédit que la qualité du binding est cruciale pour une meilleure représentation épisodique, disponible et facilement accessible en mémoire, donc pour de meilleures performances de récupération.

Cependant, l'une des difficultés majeures dans l'étude comportementale de la formation d'une représentation épisodique réside dans le fait que le binding reste à ce jour un mécanisme dont l'existence n'est inférée qu'à travers la manipulation des caractéristiques des informations à mémoriser. De plus, dans la mesure où le succès d'un encodage n'est inféré qu'à partir des tâches de rappel ou de reconnaissance, isoler les effets d'encodage des effets de récupération devient problématique. Dans une étude typique évaluant la mémoire de la source, durant la phase d'étude les informations à mémoriser (i.e., listes de mot) sont apprises dans deux ou plusieurs contextes différents (e.g., liste A présentée par une voix masculine, liste B par une voix féminine) ou encore une seule information centrale associée à plusieurs contextes possibles (Glyski, Rubin, & Davidson, 2001 ; Mather, Henkel, & Johnson, 1997). Durant la phase test, une tâche de reconnaissance de type Oui/Non est administrée aux participants, où ils doivent répondre si le mot de la liste a été vu (« Old ») ou non (« New ») durant la phase d'étude. Pour chaque item ayant obtenu une réponse « Old », les participants doivent se soumettre à une tâche d'attribution de la source dans laquelle ils doivent décider si le mot a été prononcé par exemple par la voix masculine ou par la voix féminine. Une attribution correcte de la source impliquerait donc que l'association entre l'item et le contexte a bien eu lieu lors de l'encodage.

### 3.2.2. Bases neuroanatomiques du binding

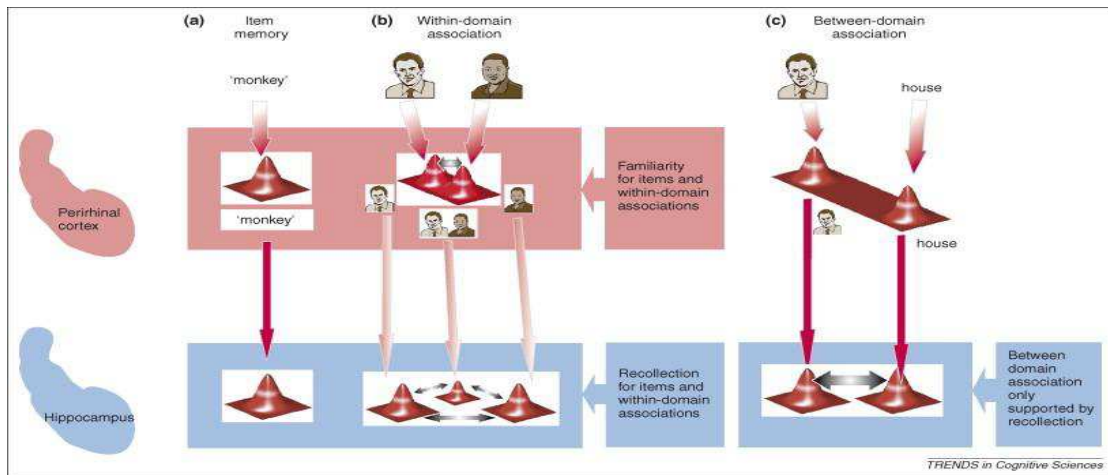
A ce jour, il n'existe pas de mesure comportementale du processus de binding directement effectuée à l'encodage. Cependant, une manière élégante d'« observer » le binding est d'avoir une fois de plus recours au paradigme de « mémoire subséquente » proposée par Sanquist et collègues (1980). Durant la phase d'étude, Staresina & Davachi (2006) ont demandé à leurs participants de juger de la plausibilité d'une paire « mot-couleur ». Après un délai les participants devaient dans un premier temps effectuer un rappel libre des mots, et dans un deuxième temps se soumettre à une tâche de reconnaissance en deux étapes. La première étape consistait à dire si l'item était vu durant la phase d'étude

(« Old ») ou pas (« New »), et pour tous les items « Old », d'associer la bonne couleur parmi celles qui sont proposées (tâche de reconnaissance associative (RA)), dans laquelle les associations cibles sont mélangées à des associations distractrices composées de paires réarrangées. Ainsi, afin de séparer les effets d'encodage des effets de récupération, les mots rappelés lors du rappel libre ont été séparés en mots pour lesquels la couleur a été « subséquentement rappelée » (il s'agissait de la tâche de RA dans laquelle le mot a été associé à la bonne couleur) ou « subséquentement oubliés » (le mot n'a pas été associé à la bonne couleur durant la tâche de RA). La *Dm* (*Différence due à la mémoire*) de signal IRM entre les items pour lesquels une association mot-couleur a été correctement reconnue/rappelée et les items pour lesquels cette association n'a pas eu lieu révéla l'activation des aires BA 35/36 qui correspondent au cortex périrhinal (CPR). Cette étude a également permis de démontrer que l'HC est également impliqué dans le mécanisme de binding, prédisant de meilleures performances de RA. En dehors de l'hippocampe, le CPR fait également partie du cortex médio-temporal (CMT), incluant également le cortex entorhinal et le cortex parahippocampique et son rôle dans la formations des associations entre les items à été montré en plus de celui de l'HC (Kirwan & Stark, 2004 ; Yonelinas, 2002), confirmant l'étude de Staresina & Davachi (2006). Ainsi, le paradigme de « mémoire subséquente » permet non seulement de s'assurer que le binding a bien eu lieu, mais également d'identifier les bases neuroanatomiques de ce mécanisme. Pourtant, selon un point de vue plutôt radical (Eichenbaum, 1997), un certain nombre d'études avait permis de montrer une dissociation entre le succès de récupération des items et celui des associations item-contexte impliquant respectivement le CPR et l'HC (Chua, Schacter, Rand-Giovanetti, & Sperling, 2007 ; Diana et al. 2007).

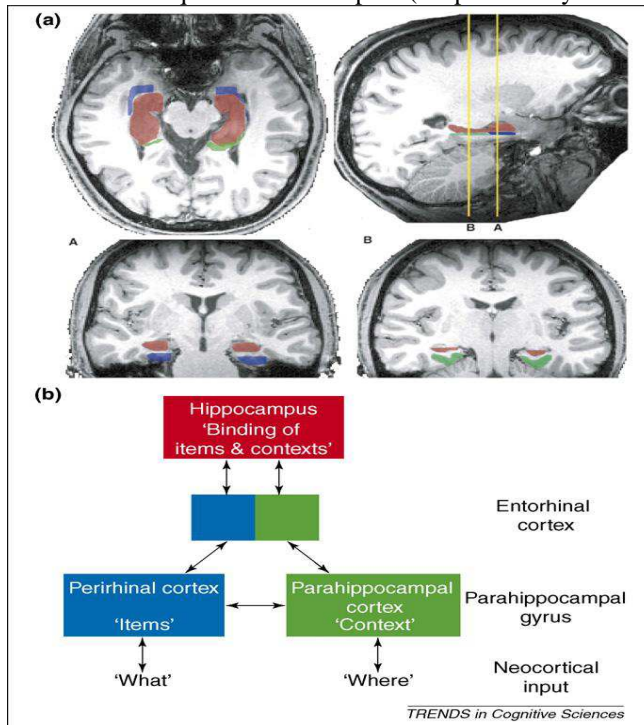
### 3.2.3. Théories neurocognitives du binding

Ces résultats conflictuels ont peu à peu permis l'émergence de l'idée de traitements associatifs distincts dans les structures cérébrales dépendant de la nature de ces associations (Staresina & Davachi, 2006 ; Yonelinas, 2002). Par exemple, Staresina & Davachi (2006) ont distingué ce qu'elles nomment le « binding associatif inter-item » qui ne reposerait que sur l'activité du CPR, du « binding relationnel » qui serait plus général, et pris en charge par l'HC. L'une des théories récentes allant dans ce sens, appelée « théorie de la dichotomie des domaines » (« domain dichotomy theory », Mayes, Montaldi, & Migo, 2007) distingue deux types de « binding associatifs inter-items » selon la nature du matériel à apprendre (Figure 4) :

d'une part, les associations inter-item considérant les items dans un même domaine de traitement, autrement dit les items traités par une seule région corticale, appelés « associations intra-domaine » et d'autre part, les associations inter-items considérant les items traités par des régions corticales distinctes, appelés « associations inter-domaine ». Selon cette théorie, par exemple, une « association inter-domaine » entre un visage (traitement visuel) et un nom (traitement verbal), qui sont deux items traités par des régions corticales différentes, sera prise en charge par l'HC tandis que l' « association intra-domaine » entre deux visages, ou bien deux noms, sera uniquement prise en charge par le CPR. L'idée de traitements corticaux différenciés selon la nature de l'association est confirmée en partie récemment par l'étude de patients souffrant de lésions hippocampiques. Ainsi, chez ses patients, l'encodage associatif intra-domaine serait préservée tandis que l'encodage associatif inter-domaine serait affecté par la lésion de l'HC (Holdstock, Crane, Bachorowski, & Milner, 2010). Cependant, la seule étude pour le moment à avoir testé la théorie de la dichotomie des domaines (Park & Rugg, 2011) en faisant l'hypothèse d'une double dissociation de type « intra-item/CPR et inter-item/HC » n'a pas permis de distinguer les effets de mémoire subséquente sur une tâche de RA entre les deux types d'associations, le CPR étant activé quel que soit le type d'association manipulée. Un autre modèle influent est le modèle « binding item-context » ou BIC (Diana, Yonelinas, & Ranganath, 2007). Selon ce modèle, autant le CPR que le cortex parahippocampique (CPH) encoderaient l'information centrale (l'item) et le contexte de manière séparée, autant l'HC encoderaient l'association item-contexte (Figure 5). Ainsi, durant l'encodage d'un item isolé, l'activation du CPR prédirait le succès à une tâche de reconnaissance n'impliquant que la familiarité (voire section « récupération »), tandis que l'HC et le CPH prédiraient le succès dans une tâche de reconnaissance impliquant la récupération unique (ou recollection) et spécifique du contexte (i.e., la localisation spatiale de l'item). Notons que dans les théories du binding, l'accent est mis sur les processus relationnels aboutissant à une mémoire relationnelle. Toutefois, ces théories font référence, même implicitement, à la distinction entre un traitement « item-spécifique » ne se focalisant que sur l'item en soi d'une part et d'autre part, la relation entre l'item et les autres items, ou bien entre l'item et le contexte, décrivant un « traitement relationnel » (voir supra concernant la distinction « item-spécifique vs. Relationnel », p. 42).



**Figure 4.** Illustration de la théorie des « dichotomie des domaines ». **a)** la représentation d'un seul item tel que « monkey » (« singe ») est renforcée dans le CPR, puis projetée vers l'hippocampe où elle sera associée à d'autres représentations contextuelles à long terme ; **b)** association intra-item « visage-visage » dans le CPR. Puis, les visages séparés ainsi que l'association en soi sont projetés vers l'hippocampe, qui considérera chacun d'eux comme « contexte » pour la récupération de l'une des trois formes de représentation ; **c)** l'association inter-domaine entre un visage et un mot sera directement effectuée par l'hippocampe, l'un devenant « contexte » pour l'autre selon l'item qui doit être récupéré (adapté de Mayes et al., 2007).



**Figure 5.** Modèle BCI. **a)** anatomie du LTM. Localisation approximative de l'HPC (en rouge), du CPR (en bleu) et du CPH (en vert) sur des images IRM pondérées en T1 ; **b)** rôle hypothétique des régions du MTL dans le traitement des items, du contexte, et de leur association, selon le modèle BCI. Les flèches bidirectionnelles montre les connexions anatomiques entre les régions du MTL (adapté de Diana et al., 2007)

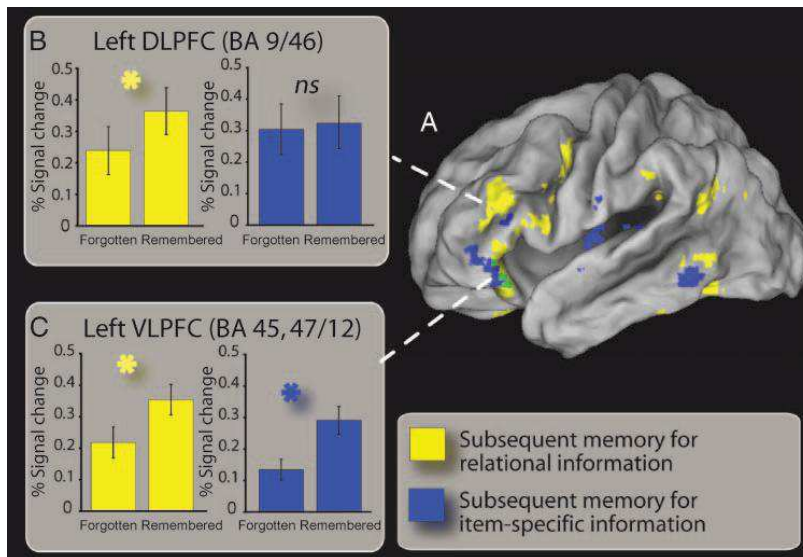
### 3.3. Traitement item-spécifique et traitement relationnel

Dans les théories neurocognitives du binding, la distinction était faite entre un encodage des items isolés et celle de l'association entre les items, ou bien de manière plus générale, de l'association entre l'item et le contexte. Cette distinction a déjà été supposée environ 30 ans plus tôt par Hunt & Einstein (1981). Ces auteurs différencièrent l'approche de la répétition d'élaboration et l'approche du regroupement sémantique dans les phénomènes

d'organisation à l'encodage, en se référant au premier comme étant essentiellement de type « item-spécifique » tandis que le second est considéré essentiellement comme « relationnel ». Une définition plus générale proposée par ces auteurs est que le traitement item-spécifique ne porte l'attention du sujet que sur ce qui émerge comme distinct parmi les items qui sont encodés, tandis qu'ils se réfèrent au second comme un encodage qui focalise l'attention sur les similarités perceptuelles ou sémantiques entre les items. Dans une procédure expérimentale typique, des tâches d'orientations distinguant ces deux types de traitements sont administrées aux participants (Einstein & Hunt, 1980). Bien entendu, le rôle de chacun des types de traitement est important pour la récupération des événements dans la mémoire épisodique. Par exemple, le traitement item-spécifique résulte en un meilleur rappel des items individuels d'une liste, même au sein d'une liste comportant des catégories sémantiques (Hunt & Seta, 1984 ; Tulving & Pearlstone, 1966), et typiquement, permet une meilleure discrimination des items individuels cibles et les items non étudiés dans la liste durant la tâche de reconnaissance (Einstein & Hunt, 1980). Le traitement relationnel apporte un cadre théorique à l'effet bénéfique du regroupement sémantique durant la phase d'apprentissage sur le rappel libre mais pas sur la reconnaissance (Mulligan & Lozito, 2004). Ainsi, il semblerait que les deux types de traitements aient un effet bénéfique sur le rappel libre tandis que le traitement item-spécifique ne bénéficie qu'à la mémoire de la reconnaissance (Peterson & Mulligan, 2010). Le rappel libre n'est pas une mesure pure de la distinction entre les deux types de traitements, mais selon Burns (2006), on peut par exemple classer le regroupement sémantique ainsi que les mesures de l'organisation subjective comme étant des mesures de traitement relationnel, de ce fait généralisant le traitement relationnel à l'organisation subjective et à l'encodage associatif. Ainsi, le traitement relationnel ne portant que sur les liens sémantiques entre les items serait un cas particulier d'un traitement relationnel portant sur une association entre n'importe quels éléments arbitraires. D'autres mesures, tels que la perte d'items au cours d'un apprentissage, sont également considérées comme une mesure de traitement relationnel (voire le Tableau 3 pour une liste de mesures évaluant les deux types de traitements, Sauzón et al., 2006 en fin de chapitre). A l'opposé, en plus de la reconnaissance, la mesure du gain d'items au cours des essais d'apprentissage ainsi que le rappel cumulatif sont considérés comme des mesures de traitement item-spécifiques purs. Ceci dit, comme pour le rappel, il se peut que tout ne soit pas aussi clair en termes de dissociation de ces deux types de traitements même pour la tâche de reconnaissance. En effet, une tâche de reconnaissance associative (RA) peut être fortement influencée par le traitement relationnel ou item-spécifique en fonction du degré de relation entre les items mémorisés. Par exemple,

lors d'une tâche RA, on présente des paires de mots cibles ainsi que des paires de mots réarrangées dans lesquelles le mot d'une liste peut être apparié avec le mot de la seconde liste. Si la paire réarrangée comporte deux mots faisant partie de la même catégorie que la paire cible, le traitement relationnel ainsi induit ne favorisera pas une bonne reconnaissance (Blumenfield, Parks, Yonelinas, & Ranganath, 2010 ; Figure 6.). Dans le cas contraire, il sera plus facile de discriminer les paires cibles des paires réarrangées, favorisant le traitement item-spécifique à condition que la paire-cible soit encodée comme étant un seul événement (i.e., processus d'unification, Jäger, Mecklinger, & Kipp, 2006). Tout récemment, une tâche spécifique appelée tout simplement encodage item-spécifique-relationnel (ERIS, ou RISE pour *relational and item-specific encoding*) a été développée par Ragland, Ranganath et collègues (Ragland et al., 2011), spécifiquement destinée à évaluer les troubles de la mémoire épisodique dans un pathologie telle que la schizophrénie. Dans cette tâche, l'encodage relationnel est manipulé en demandant au sujet si l'image d'un objet cible peut s'insérer dans un autre objet présenté parmi deux choix possibles, tandis que l'encodage item-spécifique porte sur le fait de juger si l'objet en question est un être vivant ou pas. Les sujets sont ensuite tous soumis à une tâche de type RA.

Grâce à ce cadre de référence très pratique, de nombreux effets reliés à la récupération en mémoire épisodique ont pu être expliqués, tels que l'*effet d'isolation* (i.e., les mots de la liste surlignés en différentes couleurs pour les isolés des autres sont mieux rappelés et mieux reconnus que les autres) découvert par von Restorff (von Restorff, 1933), l'*effet de génération* (i.e., les performances de rappel sont meilleurs pour les mots générés par soi, plutôt que simplement lus, Mulligan & Lozito, 2004), l'*effet de bizarrerie* (i.e., des phrases ou des images d'autres stimuli bizarres sont mieux rappelés ou aident le rappel de mots usuels, McDaniel, DeLosh, & Merritt, 2000), l'*effet de fréquence* (i.e., les mots rares sont mieux rappelés que les mots fréquents, Watkins, LeConte, & Kim, 2000), l'*effet d'interférence perceptuelle* (i.e., les mots présentés durant une durée très brèves pendant une tâche d'identification perceptuelle sont mieux rappelés et mieux reconnus que les mots présentés pour des durées plus longues, Mulligan, 1999, Mulligan & Peterson, 2008), ou encore l'*effet Subject-Performed Task* (i.e., les paires de mots « nom-verbe » pour lesquels une action doit être performée sont mieux rappelés et reconnus que les paires apprises uniquement verbalement, Engelkamp, 2001) sur lequel nous reviendrons plus en détail dans le prochain chapitre.



**Figure 6.** Paradigme de « mémoire subséquente » dissociant le traitement item-spécifique et relationnel sur leurs bases neuroanatomiques. A. Les régions en jaune montrent les aires corticales pour lesquelles l'activité augmentait pendant le traitement relationnel. Le graphe B montre que pour le DLPFC uniquement, l'encodage relationnel a donné de meilleures performances de mémoire subséquente (« remember » > « forgotten »), tandis que l'encodage de l'item ne résultait en aucune différence significative entre les deux conditions « subséquentes ». Le graphe C, montre en revanche une activation du CPF ventro-latéral aussi bien pour des réponses « remember » aux informations relationnelles comme aux informations item-spécifiques (adapté de Blumenfeld et al., 2010).

Il est important de noter que la mise en évidence de ces effets est fortement dépendante du type de design expérimental. Par exemple, ils ne peuvent être mis en évidence que lorsque la variable indépendante (VI) d'intérêt (e.g., mots rare vs. mots fréquents, mots bizarres vs. mots communs, ...) est manipulée en tant que mesure répétée, autrement dit lorsque tous les participants ont pu étudier les deux modalités de la variable (Burns, 2006 ; Peterson & Mulligan, 2010). Par conséquent, cet effet général du type de design a alimenté les débats sur un autre concept intimement relié au cadre théorique proposé par la distinction « item-spécifique/relationnel » : *la distinctivité*. C'est parce que les items sont rendus distinctifs lors de l'encodage qu'ils sont mieux récupérés par la suite. En effet, et-ce que la distinctivité concerne la différence qui existe entre chaque item pris individuellement ? Ou bien s'agit-il de la différence qui émerge lorsque les items sont rendus distinctifs justement lorsqu'ils sont immergés dans un environnement ou un contexte qui ne permet pas de discriminer les items (Hunt, 2012) ? S'agissant d'une liste de mots, cela donne un design « mixed-list » vs. design « pure-list ». Dans un design « mixed-list », les mots bizarres et les mots usuels vont par exemple être mélangés au sein de la même liste tandis que dans un design « pure-list », la variable sera manipulée en tant que variable inter-sujet, où chaque modalité constituera une condition étudiée par l'un des deux groupes de sujets. Comme ces designs manipulent le contexte d'encodage dans lequel les mots ou les items doivent être

étudiés, il s'agit du « point de vue de l'encodage du cadre item-spécifique/relationnel de ces effets particuliers de distinctivité » (« the encoding view of distinctiveness », Hunt, 2012).

Il semblerait que cette distinction entre un encodage item-spécifique et un encodage relationnel, dans la continuité des études sur le binding, trouve des bases neuroanatomiques distinctes également. Par exemple, selon Blumenfield & Ranganath (2007), il semblerait que l'encodage d'items isolés et reliés soit pris en charge par le CPF ventro-latéral uniquement (BA 44/45 et 47/12) tandis que l'encodage relationnel reposerait uniquement sur l'activation du CPFDL (BA 9/46). Ce modèle est consistant avec les investigations portant sur les bases neuroanatomiques de regroupement catégoriel dans lequel ces régions sont également impliquées, et en particulier le CPFDL (Blumenfield et al., 2010, voire figure 6). Il semblerait que la distinction entre le traitement item-spécifique et relationnel soit également valable pour les aspects spatiaux de la mémoire épisodique. En effet, les aires préfrontales joueraient un rôle prépondérant plutôt dans la relation spatiale entre les objets en plus du lobule pariétal inférieur, suggérant un traitement relationnel, tandis que le sulcus frontal supérieur et le sulcus intra-pariétal seraient impliqués dans le traitement de la localisation spatiale des objets (Ackerman & Courtney, 2012, voire également le chapitre II sur le lien entre la mémoire spatiale et la mémoire épisodique). L'ensemble de ces données suggèrent donc que le CPF et la formation hippocampique (composée d'une part de l'hippocampe (*hippocampus proper*) et des structures adjacentes telles que le gyrus denté, le pré-subiculum, le subiculum, le parasubiculum, et du cortex entorhinal), soient différenciellement impliqués dans les deux types d'encodages, avec le CPF ventro-latéral ainsi que le CPR traitant le caractère isolé des items (Davachi, 2006 ; Murray & Ranganath, 2007), tandis que le CPFDL et l'hippocampe traitant des aspects relationnels globaux de l'encodage (Murray & Ranganath, 2007), le premier étant plus spécialisé dans le traitement item-spécifique de nature tandis que le second étant plus spécialisé dans les associations inter-items et le traitement relationnel.

### **III. Récupération en mémoire épisodique**

Nous avons vu précédemment la manière dont un individu forme les représentations de ce qu'il vit comme expériences ou événements, appelé encodage. L'encodage entretient un lien important avec la récupération, de plusieurs façons : tout d'abord, comme nous l'avons déjà mentionné, dans les études comportementales, il est très difficile de séparer les effets d'encodage, de ceux de récupération étant donné qu'au final ce sont les tâches de récupération qui servent de mesures des performances mnésiques. Ensuite, comme nous l'avons également



souligné, du succès de cette étape d'encodage dépend le succès de la récupération. Enfin, comme nous le verrons plus en détails, les théories aussi bien issues de la tradition cognitiviste que des recherches en neurosciences cognitives penchent pour une sorte de « chevauchement de processus » entre l'encodage et la récupération.

Quoi que nous fassions dans notre quotidien, à moment où à un autre nous ne pouvons pas nous empêcher de penser à des choses que nous avons faites récemment ou il y a dix ans, mais aussi sans aucun doute des choses qui nous sont arrivées, des choses que nous avons vécues. Parfois, ces choses nous viennent à l'esprit sans que nous fassions un effort mental, conscient, comme ce matin où en ouvrant mes yeux le nom d'un de mes amis d'école a soudainement refait surface dans mon esprit sans que je le veuille alors que je n'avais sans doute jamais pensé à lui depuis 15 ans, et une situation particulière que j'avais vécue en sa compagnie m'est revenu en mémoire avec vivacité ! Parfois, nous recherchons en mémoire une information bien spécifique, nécessitant un effort conscient. Par exemple, un jour j'avais oublié une enveloppe contenant un document important dans une librairie et il a fallu attendre le lendemain pour me rendre compte que je n'avais plus l'enveloppe, sans pouvoir me rappeler exactement où l'avais-je laissée. J'ai donc dû faire un effort mental considérable pour retracer mentalement le chemin que j'avais effectué en ville en m'arrêtant sur des points de repères mentaux (i.e., correspondant à des représentations de certaines boutiques que j'aurais pu visiter). Ainsi, peut-on définir la récupération comme une tentative d'accès ou une accessibilité effective aux informations stockées dans la MLT épisodique (Rugg & Wilding, 2000).

Depuis Ebbinghaus les psychologues ont toujours cherché à mesurer la précision avec laquelle les gens rappellent les souvenirs, mais également les stratégies que les gens mettent en place pour les rappeler. Un autre volet de la recherche sur la mémoire concerne le fait de savoir ce qui se passe approximativement dans l'esprit des gens lorsqu'ils se souviennent avec précision ou bien lorsqu'ils oublient des informations : y a-t-il une certaine forme de conscience associée à la récupération d'un souvenir ? Peut-on définir des processus cognitifs propres à la récupération ? Que se passe-t-il dans notre esprit lorsque nous rappelons des événements qui n'ont jamais eu lieu ? Pourquoi sommes-nous parfois persuadés d'avoir vécu un événement d'une certaine manière alors qu'en réalité l'événement était bien différent ? Enfin, comment l'implication du cerveau rend compte de ces différents aspects du souvenir épisodique ? Ce sont-là les questions auxquelles les chercheurs dans le domaine de la mémoire tentent de répondre, et bien souvent la psychologie de la mémoire a pu répondre en partie à ces questions en élaborant des méthodes pour tester la mémoire ainsi que des tâches

créées dans le laboratoire, telles que les tâches de rappel et de reconnaissance. Cependant, une bonne partie des réponses ont pu être apportées d'une part par la neuropsychologie clinique, en étudiant les patients présentant des troubles de la mémoire consécutifs à des lésions cérébrales (Baddeley, Vargha-Khadem, & Mishkin, 2001 ; Ribot, 1881 ; Korsakoff, 1889 ; Levine et al., 1998 ; Scoville & Milner, 1957), et d'autre part par les progrès réalisés dans le domaine de la neuroimagerie (e.g., Markowitsch, 1997; Schwind & Black, 2009).

## **1. Les mesures comportementales de la récupération : le rappel et la reconnaissance**

Typiquement, le rappel libre, le rappel indicé et la reconnaissance sont des tâches utilisées depuis le début dans l'étude de la mémoire. Ce sont ces tâches qui nous permettent d'observer le comportement du sujet lorsqu'il essaye de se souvenir d'événements passés, et même lorsqu'il réussit à s'en souvenir, compte tenu du fait que la mémoire en soi est un phénomène insaisissable, impalpable. Les comportements liés aux tâches de rappel et de reconnaissances nous donnent un aperçu sur le fonctionnement de la mémoire, mais ce sont des « produit dérivés » de ce fonctionnement. A son tour, le fonctionnement de la mémoire épisodique n'est lui-même qu'un produit dérivé du fonctionnement du cerveau (Richardson-Klavehn, 2010).

### *1.1. Le rappel libre*

Dans une tâche de rappel libre, comme son nom l'indique, l'expérimentateur ou le clinicien demande au participant ou au patient de rappeler les items étudiés, qui peuvent être des images, des mots, des paires de mots, ou bien des figures géométriques, sans tenir compte de l'ordre. Ainsi, contrairement au rappel sériel, le rappel libre ne tient pas compte de l'ordre dans lequel les items ont été présentés durant la phase d'étude ce qui donne sa caractéristique « libre » au rappel (Metcalf & Murdock, 1981). Nous avons mentionné le fait que le rappel libre sert à mettre en évidence l'effet d'apprentissage, par exemple en utilisant le paradigme de rappel libre multi-essais. Il s'agit là d'une forme particulière de rappel libre, appelé rappel libre immédiat, en raison de la nécessité de récupérer les items immédiatement après les avoir étudiés. Cependant, le rappel libre peut également être administré de manière différée, en introduisant un délai entre la phase d'étude (i.e., l'encodage) et la phase test (i.e., la récupération), que ce soit lors d'une procédure expérimentale ou lors d'une évaluation d'ordre clinique. En général, à la différence du rappel libre immédiat, ce rappel différé permet d'évaluer un autre processus spécifique à la mémoire épisodique : le stockage à long terme ou

bien la consolidation, autrement dit de la *disponibilité* d'une information à long terme. Le processus de stockage (ou consolidation) en termes psychologique est très peu étudié, nous ne connaissons pratiquement rien de ce processus en psychologie cognitive, et comme le fait remarquer très justement Wixted (2004), la plupart des recherches dans ce domaine ont portées sur les aspects neurobiologiques. De plus, dans la plupart des manuels de psychologie cognitive, ce concept est complètement éludé. Pour ces raisons, le présent travail ne le détaillera pas non plus. Qu'il s'agisse de rappel libre immédiat ou différée, on relève une mesure quantitative spécifique permettant d'avoir une estimation de la précision du souvenir : le nombre de mots correctement rappelés, qui se peut se décliner en pourcentage ou bien en proportion (en probabilité) de rappels corrects.

## 1.2. Les modèles de récupération basés sur le rappel libre

### 1.2.1. Les modèles generate-recognize

A partir des observations faites sur les comportements des sujets lors d'une tâche de rappel libre, il a été possible d'émettre des hypothèses sur ce qui se passe probablement lorsque ceux-ci produisent les mots qu'il faut rappeler. Un certain nombre de « modèles à deux étapes » de récupération lors du rappel libre furent proposés dans les années 70 et 80, également nommés modèles *generate-recognize* (Anderson & Bower, 1972 ; Metcalfe & Murdock, 1981 ; Kintsch, 1970). La plupart de ces modèles proposent que les mots soient générés à partir de la mémoire sémantique. En effet, lorsque le sujet voit ou entend un mot, sa représentation dans le réseau sémantique est activée. Cependant, si l'on considère les modèles de représentations dans le réseau sous forme de diffusion de l'activation, le système de mémoire sémantique générera tous les candidats possible pour ce mot cible dans un premier temps. Puis, dans un second temps, parmi ces candidats le mot cible sera choisi, est reconnu comme appartenant à la liste étudiée. Ces modèles présentent plusieurs propriétés : tout d'abord, ce sont des modèles de traitement sériel : la reconnaissance ne peut avoir lieu sans la génération lors d'un rappel libre. De plus, il explique un certain nombre de phénomènes dans les rappels libres tels que les effets de fréquences ainsi que les effets d'organisation des items par catégorie sémantique (Kintsch, 1968), directement dérivés des propriétés d'activation du réseau sémantique (Collins & Loftus, 1975), et correspondant à la phase de génération. A la différence des modèles d'Anderson & Bower (1972) ou de Kintsch (1970), Metcalfe & Murdock proposèrent un modèle plutôt computationnel de génération-reconnaissance, dans lequel les mots n'étaient pas générés par les activations du réseau sémantique mais plutôt par

un « vecteur cumulatif » formé à partir de la combinaison des mots de la liste étudiée. En effet, les « vecteurs » représentent des registres de stockages des items mémorisés, et les items sont mémorisés par des opérations mathématiques de « convolution », qui rendent compte de processus associatif entre les items. Par conséquent, le processus de génération ne résulte pas en un ensemble de mots candidats mais d'un seul vecteur associé à un indice de rappel provenant de la liste elle-même. Ce modèle fut construit en partie afin de répondre à la critique de Tulving & Thompson (1973) selon laquelle ces modèles ne pouvaient rendre compte du fait des mots peuvent être rappelés sans qu'ils soient ultérieurement reconnus, alors que le modèle prédit la réussite à la reconnaissance si le mot a également été rappelé, puisque le rappel (la génération) précède la reconnaissance.

### *1.3. La reconnaissance*

La mémoire de la reconnaissance est une modalité particulière par laquelle un souvenir épisodique peut être récupéré. Elle se réfère à la capacité que l'individu a de juger qu'un événement ou un item a été déjà « vécu » ou « vu » auparavant. Elle est typiquement évaluée par une tâche de reconnaissance durant la phase test des procédures expérimentales. Dans une tâche de reconnaissance typique, les items encodés précédemment durant la phase d'étude sont mélangés avec des items nouveaux. La tâche du sujet est de décider si l'item a été précédemment vu ou pas. Si c'est le cas, il répond « oui », et dans le cas contraire, il répond « non ». L'une des variantes de ce type de test le plus couramment utilisé consiste classer l'item comme « ancien » (« Old ») ou « nouveau » (« New »). Cependant il existe plusieurs types de tâches de reconnaissance. Par exemple, dans une tâche de reconnaissance à choix forcé, l'item cible est présenté en même temps que l'item distracteur. Et le sujet doit reconnaître la cible. La distinction entre la mémoire de l'item et la mémoire des associations tient une place importante dans la définition du fonctionnement de la mémoire épisodique, et nous pouvons ranger ces deux types de tâches de reconnaissance parmi celles qui mesure la récupération de l'item. Cependant, il existe une troisième forme de tâche de reconnaissance, communément appelée tâche de reconnaissance associative ou RA (que nous avons mentionné dans la partie portant sur l'encodage sans la détailler), qui est supposée évaluer la mémoire des associations (ou mémoire associative). Dans une tâche de reconnaissance associative typique, les sujets doivent décider si les paires qu'ils avaient précédemment étudiées sont les paires cibles (paires intactes) ou non (paires réarrangées).

## 1.4. Les modèles de récupération basés sur la reconnaissance

### 1.4.1. Théorie du seuil et théorie de la détection du signal

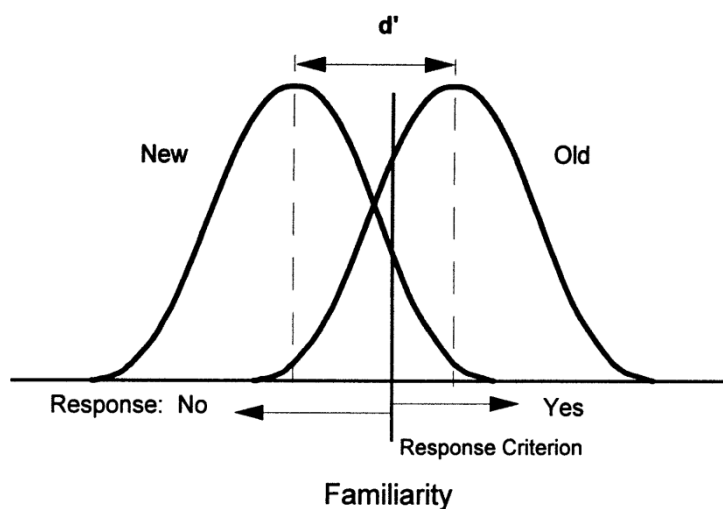
La théorie du seuil (« ou high-threshold theory », Swets, 1961) est née dans le contexte de l'application de la théorie de la détection du signal (TDS) à la psychophysique (Von Békésy, 1930). Comme en témoigne la littérature entre les années 30 et les années 60, la plupart des recherches dans le domaine étaient appliquées à l'étude de la perception, notamment celle du son (pour une revue, voire Luce, 1963). Ces recherches ont donc naturellement élaboré une théorie de la manière dont ces stimuli perçus sont reconnus. Dans la théorie du seuil, il était avancé qu'un stimulus devait dépasser un seuil de détectabilité pour être reconnu comme ayant été précédemment étudié durant la tâche de reconnaissance ; en dessous de ce seuil, le souvenir n'était tout simplement pas formé, suivant une loi probabiliste du « tout ou rien ». Les erreurs de mémoire dans ce cas sont considérées comme le résultat d'une réponse faite au hasard, ou par « devinette », s'il s'agit d'une réponse laxiste, ou bien d'une réponse plus conservatrice amenant le sujet à considérer l'item comme n'ayant jamais été étudié. De ce fait la probabilité de répondre « Oui » sachant que l'item cible était présent  $P$  (« Oui »/cible) dépend de la qualité de la remémoration et de la réponse donnée au hasard selon la formule suivante :

$$P(\text{« Oui »/cible}) = R + (1-R)*D \text{ et } P(\text{« Oui »/leurre}) = D$$

Où  $R$  représente la recollection,  $D$  le devinement, la réponse donnée au hasard, et  $1-R$  la probabilité que l'item ne soit pas recollecté (Yonelinas et al., 1997).

La TDS fait partie d'un champ spécifique de la psychologie, appelé *psychologie mathématique*, dont le but est de concevoir des modèles mathématiques du comportement et de la cognition, non seulement dans le but de comprendre comment fonctionne l'esprit humain mais également de prédire les comportements. Ce champ disciplinaire enveloppe non seulement la psychophysique classique, la psychologie cognitive, mais aussi le domaine de la psychométrie (Anastasi, 1954). Dans le domaine de la détection du signal, il s'agit de détecter un *signal* en présence du *bruit*, autrement dit d'appliquer une *décision* face à un *stimulus* de nature perceptif. La décision et le stimulus perceptif sont les deux variables fondamentales de la TDS (DeCarlo, 2010). Trois différences majeures peuvent être notées par rapport à la théorie du seuil : 1) la détection du signal ne dépend pas uniquement de la réponse « Oui », qui normalement doit être donnée lorsque le signal est détecté, mais également de la réponse « Oui » donnée lorsque le bruit est présent (ou lorsque le signal est absent), donnant ainsi la

possibilité que le bruit soit correctement rejeté (Green & Swets, 1966). Dans le domaine de la mémoire de la reconnaissance, l'application de cette approche fut suggérée par Murdock bien des années plus tard, en 1965, en terme de capacité de discrimination (ou *discriminabilité*) entre les items « familiers » (déjà étudiés) et les items nouveaux. 2) Par conséquent, la deuxième différence majeure réside dans le fait qu'il ne s'agit plus d'une trace unique qui sera présente lorsque le seuil sera dépassé, et absente lorsque le seuil ne l'est pas (loi du « tout ou rien ») ou qu'il est placé trop haut, mais d'un continuum sur l'axe de la familiarité, correspondant à la notion de la *force de la trace*  $\psi$ , mesurée par le paramètre  $d'$ , qui mathématiquement représente la distance euclidienne entre la distribution du signal et celle du bruit. Ainsi, un item étudié donnera la réponse « Oui » ou « Vu » (« Old ») parce qu'il sera plus familier, donc une trace plus forte qu'un item non étudié, dont la trace sera faible (Yonelinas et al., 1997), aboutissant ainsi à une variation de cette force de la trace. Et enfin, 3), à la différence d'un *seuil*, qui représentait une sorte d'activation neurale/sensorielle directement dérivée de la psychophysique de Fechner (Fechner, 1966 ; Swets, 1961), la TDS parle de *critère*, notion plus en rapport avec la prise de décision volontaire et mesuré par le paramètre  $\lambda$ , qui représente la stratégie de décision appliquée par le sujet (en terme de réponse conservatrice ou laxiste par exemple). On peut distinguer deux modèles particuliers dans le domaine de la détection du signal : le *modèle de détection à variance égale* (Mcmillan & Creelman, 2005), et le *modèle de détection à variance inégale* (Green & Swets, 1988).



**Figure 7.** Modèle de détection du signal à variance égale (adapté de Yonelinas, Dobbins, Szymanski, Dhaliwal, & King, 1997).

Dans le modèle à variance égale (Figure 7), la discriminabilité entre le signal et le bruit aboutit à deux distributions gaussiennes de variances égales, l'une correspondant aux

réponses données au bruit et l'autre aux réponses données au signal, dont la moyenne sert de *critère* de décision. Ce modèle suppose donc que la force de la trace mnésique soit identique non seulement entre les items de la liste, mais par conséquent également entre les items cibles (signal) et les leurres (bruit), ce qui en réalité serait peu plausible. Dans le modèle à variance inégale, l'écart-type de la distribution du signal est estimé approximativement comme étant 1.25 fois supérieure à celui de la distribution du bruit, par conséquent cela suppose également que la force de la trace mnésique soit différente non seulement entre les items de la liste, mais également entre les items cibles et les leurres, ce qui paraît plus réaliste (Wixted, 2007). Wixted (2007, p. 154) va ainsi jusqu'à considérer que « la cible peut être finalement considérée comme un leurre qui possède une force de la trace mnésique juste parce qu'elle apparaît dans la liste ».

#### 1.4.2. Modèle de traitement dual de mémoire de reconnaissance: recollection et familiarité

Le modèle de traitement dual de la reconnaissance propose qu'il n'y aurait pas uniquement un *seuil élevé* d'un côté et la *détection du signal* de l'autre pour expliquer le fonctionnement de la mémoire de la reconnaissance, mais aussi la possibilité d'une combinaison des deux (Yonelinas, 2002). En effet, selon ce modèle un item peut être reconnu soit parce que le sujet a pu accéder à la représentation de cet item en mémoire grâce à une *recollection* soit grâce à la *familiarité*. La recollection serait considérée comme un processus obéissant au principe du seuil élevé selon lequel le souvenir serait présent uniquement si ce seuil est franchi, tandis que la familiarité est considérée comme un processus de détection du signal (Yonelinas, 2002). La recollection serait une récupération épisodique non seulement de l'item en soi, c'est-à-dire de l'information centrale, mais aussi de son contexte associé, ce qui contribuerait à la récupération consciente de l'événement avec tous ses détails, de manière vivace tandis que la familiarité est liée au fait de savoir que l'on a déjà vécu un événement sans pouvoir rappeler le contexte ou les détails épisodiques associés (Tulving, 1985). Pour illustrer la familiarité, je peux reprendre l'exemple du visage qui me semble connu, dont je peux dire que je l'ai déjà vu « quelque part », sans pouvoir dire dans quelles circonstances (à la bibliothèque ? Dans une soirée ?). Il est généralement considéré qu'une tâche classique de reconnaissance de type « Oui/Non » implique plus la recollection (même si une part de familiarité est également impliquée) tandis qu'une tâche de reconnaissance à choix forcé n'impliquerait que la familiarité (McMillan & Creelman, 2005). Cette différence serait constatée par le niveau de confiance accordé à la réponse. Par exemple, une recollection

génère plus de confiance dans une réponse de type « Oui », en présence d'une cible (*recollect-to-accept*) que dans une réponse « Non » en l'absence de cible (*recollect-to-reject*), alors que ce niveau de confiance serait très bas pour les items qui ne sont récupérés que par familiarité (Heathcote, Raymod, & Dunn, 2006). La distinction entre ces deux processus a été considérée par différents auteurs selon différentes approches et cadres théoriques. Par exemple, selon le cadre proposé par Larry Jacoby et ses collègues, il semblerait que ces deux processus aient des propriétés de fonctionnement identique à la dissociation entre *processus contrôlés* et *processus automatique* (Jacoby & Dallas, 1981). En effet, la recollection impliquerait la mise en place de processus contrôlés, tandis que la familiarité serait un processus automatique (Jacoby & Dallas, 1981 ; Mandler, 1980). Selon le cadre proposé par Endel Tulving, la différence entre la recollection et la familiarité est expliquée en termes de distinction entre *mémoire épisodique* et *mémoire sémantique*, respectivement (Tulving, 1985 ; Tulving, 2002). Cependant, ces perspectives théoriques ne sont pas nécessairement opposées, et on peut même dire que ces recherches ont abouties à une meilleure caractérisation de cette distinction en termes de processus/mécanismes (voire Table 2).

**Table 2.** Distinction entre recollection et familiarité en termes de processus

		Processus			
Mémoire	Mémoire épisodique	Recollection	Contrôlés	Conscient	Théorie du seuil
	Mémoire sémantique	Familiarité	Automatique	Inconscient	Détection du signal

#### 1.4.3. Mises en évidence de la dissociation recollection vs. familiarité

Différentes méthodes ont été utilisées par les chercheurs afin de rendre compte de la dissociation entre la recollection et la familiarité, les unes étant comportementales, les autres utilisant les techniques de neuroimagerie (voire Yonelinas, 2002, pour une revue). Parmi les méthodes comportementales, deux classes de méthodes peuvent se distinguer : les unes basées sur une *dissociation des tâches* où les caractéristiques de tâches permettent d'inférer la distinction entre ces deux processus, les autres basées sur une *estimation de paramètres* liés aux processus et utilisant des techniques statistiques et équations différenciant ces deux processus. Par exemple les méthodes de la première classe permettent de comparer les performances entre la reconnaissance d'item (RI) vs. reconnaissance associative (RA), ou



encore entre deux tâches de RI différentes telles que la RI (i.e., de type « Oui/Non ») et la reconnaissance à choix forcé (CF). En revanche, les méthodes de la seconde classe utilisent trois procédures très populaires en psychologie et neurosciences cognitives, à savoir la *procédure de dissociation des processus* (PDP, Jacoby, 1991), le *paradigme Remember/Know* (Tulving, 1985 ; Gardiner & Richardson-Klavehn, 2000), la méthode des courbes ROCs (Wixted, 2007) (pour une description succincte de ces méthodes, voir l'Annexe 1) Ces méthodes sont souvent combinées avec des *études lésionnelles*, d'une part pour évaluer cette dissociation, et d'autre part afin de déterminer la localisation anatomique de ces processus. S'ajoutent à ces méthodes comportementales l'utilisation de techniques de *neuroimagerie*, permettant de rendre compte de modèles neurocognitifs de la dissociation entre la recollection et la familiarité.

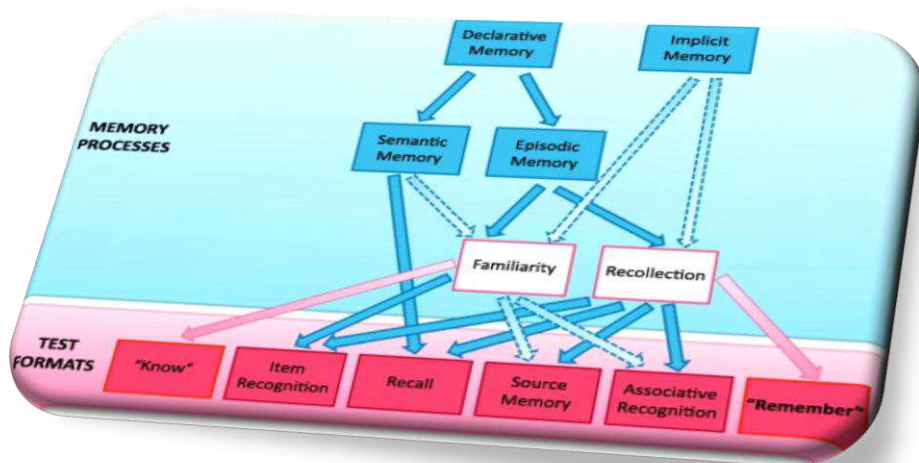
#### 1.4.3.1. Dissociation des tâches : exemple tâche RI vs. RA

L'une des considérations qui permettent de comparer la RI et la RA porte sur le fait que ces deux tâches ne supportent pas des processus identiques. La RI, mesurée par exemple par une tâche de reconnaissance de type Oui/Non, est de manière générale considérée comme reposant à la fois sur la recollection et la familiarité tandis qu'une tâche de RA reposerait massivement sur la recollection, car nécessitant une récupération aussi bien de l'item que de son contexte (Mandler, 1980). Ainsi, certaines manipulations durant l'encodage peuvent favoriser l'un ou l'autre de ces processus. Par exemple, le fait de diviser l'attention du sujet pendant la phase d'étude aura une incidence sur le fonctionnement de l'un des deux processus. Troyer, Winocur, Craik, & Moscovitch (1999) ont ainsi demandé à des sujets d'effectuer deux tâches concurrentes pendant la phase d'étude dans un groupe « condition attention divisée » comparé au groupe contrôle. Les auteurs ont ainsi noté que comparée à la condition contrôle, la condition « attention divisée » donnait une différence importante entre la RI et la RA en faveur de la première, rejoignant en cela l'idée que la RA, impliquant la recollection, est un processus mobilisant plus de ressources attentionnelles (Hicks & Marsh, 2000). Cet effet délétère de l'attention divisée sur la recollection se manifeste également à la récupération (Dudukovic, DuBrow, Wagner, 2009), allant dans le sens de l'idée que a) l'encodage et la récupération entretiennent des relations, b) un encodage efficace (i.e., élaboration, binding, ...) permet une recollection épisodique, et c) la recollection pendant la phase de récupération dépend de processus de recherches d'informations en mémoire qui demande un effort mental. Cameron & Hockley (2000) ont pu montrer que la RI était plus

sensible à cet effet que la RA, supportant l'idée que la première serait plus influencée par la familiarité tandis que la seconde par la recollection. Le fait d'énoncer aux sujets qu'ils vont devoir plus concentrer leur attention sur les paires de mots à apprendre augmente également leurs performances dans une tâche de RA comparée à une tâche de RI (Hockley & Cristi, 1996). La similarité des performances entre le rappel libre et la RA comparé à une RI (May & Sande, 1982) permet également de penser que la RA, tout comme le rappel libre, implique la recollection alors que la RI impliquerait la familiarité et la recollection. D'autres types de manipulations à l'encodage ont également permis de dissocier les deux processus, comme par exemple la manipulation des niveaux de traitement vont également dans le sens d'une similarité entre la rappel libre et la RA, où la performance dans les deux tâches est améliorée de manière similaire pour des items traités en profondeurs comparée à aux items traités superficiellement. De la même manière, il est également considéré que la tâche de reconnaissance à choix forcé reposerait exclusivement sur la familiarité, rendant possible la comparaison entre celle-ci et par exemple la tâche de RI de type Oui/Non. La plupart des études ont ainsi pu montrer que généralement les performances dans une tâche de reconnaissance à choix forcé sont meilleures que sur une tâche de reconnaissance type Oui/Non (Migo et al., 2009 ; Westerberg et al., 2006). Migo et al. (2009) ont par exemple comparé les performances des sujets entre une tâche classique de reconnaissance de type Oui/Non et deux variantes de la tâche de reconnaissances à choix forcé, la première avec un item cible et un leurre sémantiquement relié présentés simultanément (dite tâche à choix forcé congruente ou CF-C) et la deuxième dans laquelle l'item est présenté en même temps qu'un leurre pouvant avoir un lien avec d'autres types d'items cibles (e.g., les mots de la seconde liste), dite tâche à choix forcée non-congruente ou CF-NC. Les auteurs ont pu montrer que les performances des participants étaient meilleures dans la tâche CF-C par rapport aux deux autres tâches, impliquant que la recollection et la familiarité serait identiquement impliqué dans une tâche type Oui/Non et une tâche CF-NC, tandis que seul la familiarité serait en jeu dans une tâche CF-C. D'autres auteurs (Buchler, Light, & Reder, 2008) ont utilisé un paradigme différent pour évaluer la part de la RI dans une tâche RA en utilisant une variante de celle-ci dans laquelle les sujets devaient correctement juger les paires « ancien-ancien », « ancien-nouveau », « nouveau-ancien » et « nouveau-nouveau ». Les auteurs manipulaient la répétition des items afin d'augmenter la familiarité, et la quantité de mots associés à un mot cible pour la recollection. Des mesures de latence et d'erreurs étaient collectées. Dans cette tâche de RA, il est supposé que la récupération des associations est nécessaires afin d'émettre une reconnaissance correcte des paires intactes et correctement rejeter les paires réarrangées.

Dans cette étude, le fait de présenter de manière répétée un item particulier augmentait la force de sa trace, lui permettant d'être mieux reconnu dans une paire indépendamment de l'association. A l'inverse, le fait de présenter de manière répétitive la paire renforçait la récupération de l'association. A ce jour, nous ne connaissons pas d'études évaluant l'implication de ces deux processus en comparant directement ces différentes formes de tâches de reconnaissance, cependant lorsque ces résultats sont considérés dans leur ensemble, Il semblerait que globalement le degré d'implication de la familiarité dans une tâche suive le schéma suivant, dans l'ordre croissant: RA > RI (= CF-NC) > CF-C.

Les études sur la distinction entre les tâches d'une part, et l'estimation de paramètres dont fait également partie la procédure « R/K » ont permis d'asseoir la dissociation « recollection vs. Familiarité » (Migo, Mayes, & Montaldi, 2012). Cependant, la relation entre les tâches et les processus qu'elles mesurent serait plus complexe qu'elle ne paraît à première vue, comme le suggère la récente revue de question de Migo et al., (2012), comme illustrée par la Figure 8, proposée par ces auteurs.



**Figure 8.** Complexité de la relation entre les types de tests et les processus mnésiques mesurés. Les flèches bleues représentent les relations théoriques et empiriques établis. Les flèches roses une relation exclusive entre le format du test et le processus qu'il mobilise (e.g., « remember » mobilise exclusivement la recollection et « know » exclusivement la familiarité, raison pour laquelle cette procédure est considérée comme donnant une estimation quasiment pure de ces deux processus). Les flèches bleues représentées par des traits discontinus reflètent un lien possible entre le processus en question et le test. Par exemple, alors que la tâche RA est considérée comme reposant uniquement sur la recollection, dans certaines conditions bien spécifiques (Jäger & Mecklinger, 2009) il se peut qu'elle soit influencée par la familiarité. (adapté de Migo et al., 2012).

#### 1.4.4. Bases neuroanatomiques de la recollection et de la familiarité

Dans la tradition de la neuropsychologie clinique, prendre comme référence la pathologie s'est révélé très utile, pour deux raisons principales : la première est que cela a permis d'estimer la préservation ou l'altération de l'un de ces deux processus et la seconde réside dans le fait que cela a permis de comprendre les bases neuroanatomiques de chacun d'eux. Bien évidemment, l'une des premières sources d'étude dans ce cas est l'amnésie. La première motivation de l'étude de la recollection et de la familiarité du point de vue des patients amnésiques fut le fait qu'ils ont des performances altérées sur les tests de mémoire explicite, mais des performances au moins aussi égales que celles de contrôles sur les tests de mémoire implicite (Warrington & Weiskrantz, 1968), tandis que la seconde concerne bien sûr la localisation de la lésion cérébrale à l'origine de l'amnésie (e.g., une amnésie hippocampique, Bird, Shallice, & Cipolotti, 2007). Mais cette dissociation a été également étudiée, de manière générale, dans d'autres populations telles que les patients souffrant de la maladie de Parkinson (Cohn, Moscovitch, & Davidson, 2010) ou de la schizophrénie (Libby, Yonelinas, Ranganath, & Ragland, 2013). La recollection et la familiarité chez ces patients a été étudiée aussi bien en ayant recours aux méthodes de dissociations des tâches que par les méthodes d'estimations de paramètres (voir Annexe 1).

La méthode de dissociations des tâches est pratique dans la mesure où l'étude des patients peut démontrer l'attribution de différents processus cognitifs à ces différentes tâches. De nombreuses études ont pu montrer que non seulement le rappel libre est altéré chez les patients amnésiques mais également pour une large part la reconnaissance (Reed & Squire, 1997). Cependant, il semblerait que l'altération des performances sur les tâches de reconnaissance dépende de la demande de ces tâches en processus contrôlés ou en degré de recollection. Ainsi, les études ayant comparé les tâches de RI avec les tâches de RA ont généralement constaté une dissociation en termes de performances : les performances des patients semblent moins affectées sur une tâche de RI que sur une tâche de RA. Ce type de résultat est évident chez des patients présentant des lésions restreintes, focalisées, au niveau de l'hippocampe (Gold, Hopkins, & Squire, 2006 ; Holdstock, Mayes, Gong, Roberts, & Kapur, 2005). Par exemple, Holdstock et al. (2005) ont montré que le patient B.E., atteint d'une encéphalite herpétique en 1991 et présentant une atrophie hippocampique bilatérale en 1992 et un hypométabolisme temporel également bilatéral (Kapur & Brooks, 1999) avait de meilleures performances sur les tâches de reconnaissance de type Oui/Non et de reconnaissance à choix forcé mais des performances altérées sur les tâches de RA et de rappel

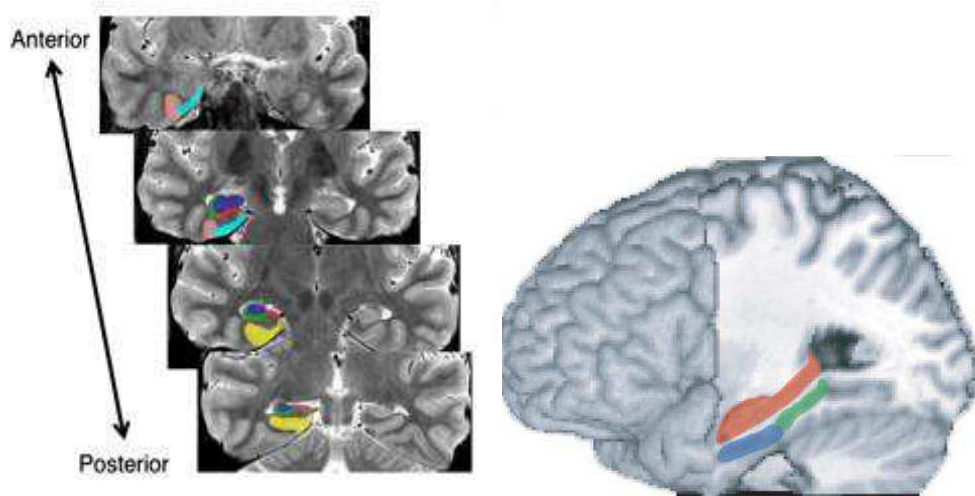
libre. Cependant, même les performances sur la tâche de type Oui/Non étaient clairement altérées par rapport à la tâche de reconnaissance à choix forcé dans la mesure où elle fait intervenir aussi bien la recollection que la familiarité. Les lésions focales offrent évidemment une meilleure appréciation de l'implication des structures telles que l'hippocampe dans la recollection et la familiarité, mais ce résultat semble également patent dans d'autres neuropathologies. Ceci a été montré notamment chez les patients souffrant de schizophrénie, présentant entre-autres des anomalies fonctionnelles notables au niveau du DPFDL gauche et du CPF inférieur droit (Achim & Lepage, 2003). Chez les patients présentant un diagnostic de schizophrénie, la méta-analyse de Achim & Lepage (2003) a montré par exemple que la taille de l'effet était plus importante pour les tâches de RA, avec  $r = .48$  comparée à celle des tâches de RI, avec  $r = .40$ , révélant une plus grande altération sur les premières comparées aux secondes. Westerberg et al., (2006) avaient aussi montré qu'une tâche de reconnaissance d'item (RI) de type choix forcé donnait des performances équivalentes entre les sujets MCI (Mild Cognitive Impairment) de type amnésique et les contrôles, une tâche RI de type « Oui/Non » est en revanche nettement altérée chez les premiers par rapport aux seconds. Ces patients démontreraient donc en général une familiarité intacte mais une recollection altérée, en accord avec les résultats sur la dissociation entre la mémoire explicite/implicite. Cependant, comme le suggère Migo et al. (2009), il serait imprudent de superposer la familiarité à la mémoire implicite, car 1) les performances des patients amnésiques peuvent être atteintes sur différentes formes de reconnaissance à choix-forcée, alors qu'elle est presque toujours épargnée sur les tâches de mémoire implicite, et 2) elles peuvent être même épargnées sur des aspects très subtiles de la mémoire associative : par exemple, la performances de RA serait épargnée pour les « associations intra-domaine » telles que « visage-visage » ou « mot-mot », en revanche les « association inter-domaines » tels que « visage-nom » ou « image-mot » peuvent être altérée (Mayes et al., 2004). D'autres études ont au contraire montré que l'étendue de l'altération serait similaire entre la tâche de RI et la tâche de RA (Gold et al., 2006 ; Stark, Bayley, & Squire, 2002), et qu'une aide apportée sous forme de présentation répétée des items améliorent les performances des patients au point de les égaliser avec celles de contrôles (Stark et al., 2002, exp. 2), allant dans le sens des anciens résultats rapportés par Reed & Squire (1997). Ces résultats suggèrent donc que l'HC ferait intervenir aussi bien la recollection que la familiarité, et les performances des sujets dépendent par conséquent de l'implication de ces processus dans les tâches. Pour résumer, un patient présentant une lésion limitée à l'HC aurait des performances altérée aussi bien sur une tâche de RI de type « Oui/Non » qu'une tâche de RA, à condition que celle-ci fasse intervenir une association

inter-domaine, la première impliquant aussi bien la familiarité que la recollection et la seconde uniquement la recollection. Alors que ses performances seraient intactes sur une tâche de RI de type « choix forcé » si celle-ci est de type NC (non-congruent), et une tâche de RA si celle-ci ne repose que sur une association intra-domaine, la première étant une tâche n'impliquant que la familiarité, alors que la seconde impliquerait les deux avec toutefois le niveau de recollection très atténué. Comme le suggère également les études faites auprès des patients atteints de schizophrénie, le CPF serait aussi impliqué dans la dissociation entre la familiarité et la recollection.

Cependant, les choses ne semblent pas être aussi linéaires qu'on le pense. En effet, si les tâches de familiarité sont choisies avec soin, et la procédure d'administration des tests ou la procédure expérimentale est mise en place comme il faut, certains patients à l'étude montrent une altération aussi bien de la recollection que de la familiarité (Gold et al., 2006 ; Stark, Bayley, & Squire, 2002). Ces controverses font encore une fois référence à l'idée que si la recollection et la familiarité obéissent à des lois mathématiques différentes, alors on peut les dissocier empiriquement par l'étude des lésions cérébrales, mais si les deux suivent des lois mathématiques identiques (i.e., les deux sont des processus continus compatibles avec la théorie de la détection du signal) alors elles devraient similairement être affectées chez les patients. Le second avantage à utiliser les populations souffrant de neuropathologie réside dans leur contribution à la compréhension des bases neuroanatomiques de la recollection et de la familiarité.

Pour autant, globalement, la littérature penche en faveur d'une dissociation entre la recollection et la familiarité, la première étant altérée et la seconde épargnée chez les patients amnésiques. Ces résultats suggèrent aussi que l'hippocampe serait la structure sur laquelle reposeraient le processus de recollection, et dans une certaine mesure la familiarité (compte tenu du fait que dans certains cas même la familiarité est atteinte suite à une lésion hippocampique). Cependant, il semblerait que d'autres structures au sein du LTM aient également leur part à jouer dans la distinction recollection/familiarité (Shastri, 2002). Par exemple, il a été suggéré que le cortex parahippocampique (CPH) serait impliqué uniquement dans la familiarité tandis que l'HC impliquerait à la fois la recollection et la familiarité (Aggleton & Brown, 1999 ; Mayes et al., 2002). D'autres (Stark & Squire, 2003) soutiennent au contraire l'idée que la région postérieure du CPH tout comme l'HC sous-tendraient la recollection tandis que le cortex rhinal supporterait la familiarité (Figure 9). De même, le modèle Binding Item-Context (BCI, Diana et al., 2007) spécifie que l'HC et le CPH bien que distinctes du point de la nature du traitement de l'information, reposeraient sur la recollection

tandis que le CPR reposeraient exclusivement sur la familiarité (Vanssay-Maigne et al., 2011).

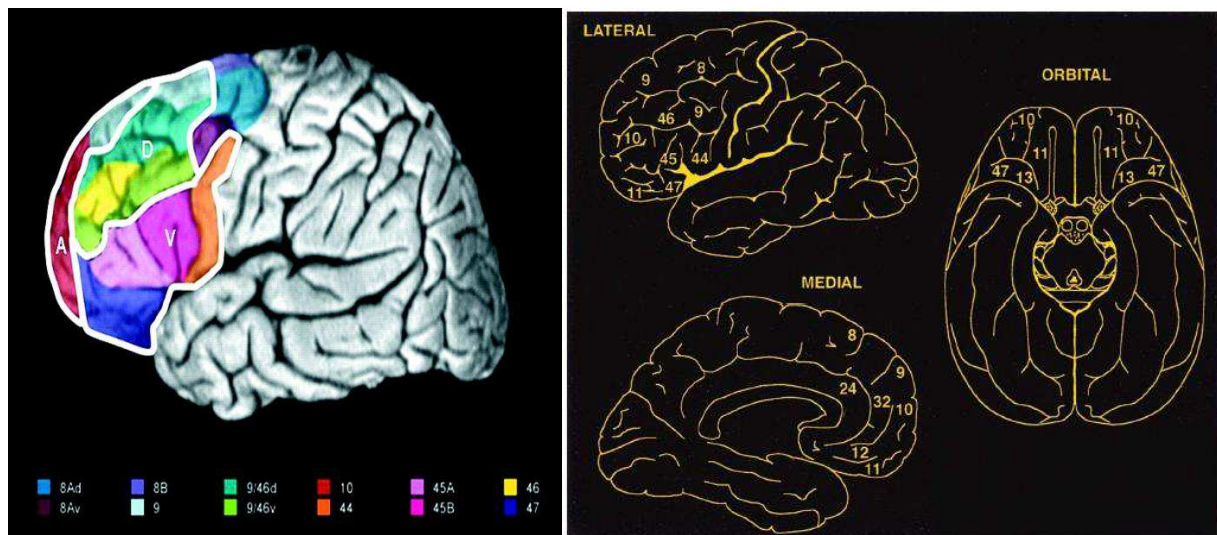


**Figure 9.** La figure de gauche représente des coupes transversales allant des régions antérieures vers les régions postérieures du LTM et montrant les ROI (region of interest) : la CA1 (en vert) et le subiculum (en rouge) faisant partie intégrante de l'hippocampe, le CPR (en rose), le cortex entorhinal (CE ; en cyan), et le CPH (en jaune) ; adapté de Carr, Rissman, & Wagner (2010). La figure de droite montre une reconstitution en 3D du cerveau humain, représentant l'anatomie du LTM : l'hippocampe (en rouge), le cortex parahippocampique (en vert), et le cortex périrhinal (en bleu) ; adapté de Ranganath (2010).

A ses points de vues contradictoires, basées sur des résultats conflictuels sur la distinction fonctionnelle entre les différentes régions au sein du LTM s'ajoute également la considération que la recollection mobilise très fortement des processus stratégiques, et de ce fait repose également en partie sur l'activité du Cortex PreFrontal (CPF) (Kahn, Davachi, & Wagner, 2004 ; Ranganath et al., 2003). En fait, lorsqu'une personne fait l'expérience subjective de recollection, autrement dit lorsqu'elle se souvient d'un épisode particulier qu'elle a vécu avec toutes les caractéristiques contextuelles et les détails perceptifs associés, ceci est considéré comme une *recupération réussie* de l'épisode. Cependant, ce succès reposerait sur l'intégrité du CPF en partie car il s'agit d'un processus contrôlé. En effet, cette réussite sous-entendrait que parmi tous les épisodes possibles vécus, certains étant différents d'autres similaires d'un point de vue perceptuel et/ou conceptuel, il a fallu effectuer un tri préalable, ce tri se référant au contrôle de la source de l'épisode (Davidson & Glisky, 2002) mais aussi à une *tentative de récupération* (Ranganath et al., 2000). La distinction entre la *recupération réussie* et la *tentative de récupération* sera examinée plus spécifiquement dans la section « phénoménologie de la récupération épisodique ». Par exemple, Ranganath et al. (2003) ont identifié plusieurs régions au sein du CPFVL comme contribuant à la recollection, notamment l'aire BA 45/47 latérale gauche, l'aire BA 44 droite et les gyri frontaux inférieurs (voire Figure 10, représentant l'anatomie du CPF). Toutefois, à l'instar du LTM, les aires du

CPF ne posséderaient pas non plus une unité ou une homogénéité quant aux processus impliqués. De ce fait, il semblerait que le CPF ne soutienne pas seulement la recollection, mais également la familiarité. Par exemple l'aire BA 6/44 avait montré un effet de mémoire subséquente à la fois pour la recollection et la familiarité dans l'étude de Ranganath et al. (2003). Des résultats similaires ont été obtenus également par d'autres auteurs (Kahn et al., 2004). Un ensemble d'évidences quant à l'implication du CPF à la fois dans la recollection et la familiarité vient des études neuropsychologiques menées auprès des patients présentant des lésions focales, localisées au niveau du CPF latérale (Aly, Yonelinas, Kishiyama, & Knight, 2011 ; Kishiyama, Yonelinas, & Knight, 2009). A l'exception de Kishiyama et al. (2009), les trois autres études trouvèrent que la lésion du CPF latérale (incluant les régions ventrales et dorsales) affecte la familiarité mais garde les performances subséquentes de recollection intactes. Ce résultat semble non seulement contre-intuitif mais semble présenter un pattern tout à fait opposé à celui présenté par les patients amnésiques. En plus du CPFVL (e.g., BA 45), le CPFDL intervient de ce fait également dans la distinction entre la recollection et la familiarité. Une méta-analyse récente de Skinner & Fernandes (2007) a pu montrer que le CPFDL (BA 9/46 droite) serait impliqué à la fois dans la recollection et la familiarité, mais la recollection seule reposerait sur l'activité additionnelle des aires BA 10 et 8 latérales gauches. Cette méta-analyse pourrait apporter un éclairage sur le pattern contre-intuitif obtenu chez les patients avec une lésion frontale latérale : il se peut que dans chacune des trois études, l'hétérogénéité de la localisation précise des lésions frontales n'ait pas été contrôlée, résultant en un échantillon avec des lésions plus restreintes aux aires BA 45 et 6. De plus, les résultats de la méta-analyse de Skinner & Fernandes (2007) sont confirmés par l'étude de Turiziani et al. (2010) dans laquelle une lésion « simulée » du CPFDL par la technique de stimulation magnétique transcrânienne répétitive (SMTr) affectait à la fois la recollection et la familiarité subséquentement. Ainsi, l'implication du CPF et du LTM dans la distinction entre la recollection et la familiarité suggère qu'il y aurait probablement une interaction entre le CPF et l'HC, d'autant plus que ces deux régions sont très fortement reliées (Goldman-Rakic, 1987). Cette étude souligne le fait que ce serait une erreur de considérer le rôle du CPF ou bien du LTM de manière isolée dans la distinction entre la recollection et la familiarité, aboutissant ainsi à des résultats parfois contradictoires.





**Figure 10.** Anatomie du cortex préfrontal du cerveau humain, les chiffres représentent les aires de Brodmann (BA). La figure de gauche représente les vues latérales, médianes et orbitales du CPF. La figure de droite représente la surface latérale du CPF, subdivisée en régions dorsale (D), ventrale (V) et antérieure (A) à l'intérieur desquelles les différentes BA sont également délimitées selon un code de couleur spécifique. Ainsi, les BA 44, 45, et 47 forment le cortex préfrontal ventro-latéral (CPFVL) tandis que les BA 9, 46 et 9/46 ventrale et 9/46 dorsale forment le cortex préfrontal dorso-latéral (CPFDL) (Petrides & Pandya, 1994), adapté de Curtis & D'Esposito (2003).

## 2. Quand la mémoire nous joue des tours

La psychologie et les neurosciences cognitives de la mémoire ont permis peu à peu l'émergence de l'idée que l'être humain ne possède pas de souvenirs qui soient une copie photographique « conforme à l'originale », mais qu'au contraire, il s'agit d'une réalité psychologique construite à partir d'un traitement de l'information, dans laquelle se mêlent nos connaissances déjà formées, nos croyances, nos théories sur le monde et sur soi, ainsi que nos émotions et sentiments. C'est la raison pour laquelle « constructive » est l'une des qualifications que l'on donne à cette mémoire épisodique (Bartlett, 1932 ; Schacter, Norman, & Koutstaal, 1998 ; Schacter & Addis, 2007 ; Tulving, 2002). Cette nature constructive de la mémoire s'illustre formidablement bien à travers ce que Daniel Schacter a appelé « les 7 péchés de la mémoire » (Schacter, 2001) par analogie avec les sept péchés capitaux. Ce livre, qui est un chef-d'œuvre de la littérature scientifique, a sa place d'ailleurs largement méritée aux côtés de *L'Origine des espèces* de Charles Darwin (Darwin, 1859) et des œuvres de Charles Dickens. Schacter et Addis (2007) n'ont évidemment pas pu s'empêcher de faire un clin d'œil au *Chant de Noël* de Dickens dans lequel l'oncle Scrooge reçoit la visite des « esprits » de Noël, les fantômes du passé, du présent et de l'avenir (Dickens, 1843). Le fantôme du passé lui fait revivre son passé, exactement à la manière d'« un voyage dans le temps mental » avec beaucoup de vivacité, des choses qu'il avait oubliées, mais le fantôme de l'avenir lui fait vivre sa vie future avec la même vivacité. Cette correspondance entre le passé

et le futur se caractérise par le fait qu'une bonne partie de nos souvenirs servent de matériel de bases pour imaginer les choses, qu'elles soient de l'ordre de la fiction (d'où un double clin d'œil à la littérature), de l'ordre de l'intention de réaliser un acte ultérieurement, ou bien des projets de vie (Hassabis, Kumaran, & Maguire, 2007 ; Schacter & Addis, 2007). Dans la présente section, nous parlerons de ces fantômes malicieux du passé qui nous jouent des tours, notamment lorsque nous oublions des choses ou bien quand nous nous rappelons de choses qui n'ont pas eu lieu, en particulier de trois de ces tours ou pêchés parmi les sept proposés: la faculté de notre cerveau à créer de faux souvenirs, illustrée à travers les fausses reconnaissances (pêchés 4, « misattribution » et 5, « suggestibility ») et la faculté d'oublier (le 3<sup>ème</sup> pêché, appelé « Blocking »), illustrée principalement par les processus d'interférences. Ces « pêchés » d'omission et de commission peuvent survenir aussi bien dans un fonctionnement normal de la mémoire que dans le cadre de pathologies.

### *2.1. Les fausses reconnaissances*

Si nous reprenons l'exemple du visage d'une personne croisée dans la rue, précédemment nous portions l'accent sur le processus de familiarité qui nous pousse à juger ce visage comme étant connu sans pouvoir y associer le contexte qui puisse l'inscrire au sein d'un souvenir épisodique. Pris de doute je me demande si je l'avais rencontré lors de la crémaillère de Pierre ou bien lors du festival du vin de Bordeaux sur les quais. Soudain, je ne sais pour quelle raison, je suis persuadé que la crémaillère serait le bon contexte associé à ce visage connu sans toutefois pouvoir en être complètement certain puisque toutes les informations la concernant me manquent. Par conséquent si on me demandait si j'ai déjà rencontré ce visage auparavant (e.g., tâche de reconnaissance de type Oui/Non), je répondrais « oui », maintenant si on me demandait si c'était lors de la crémaillère, pendant le festival, ou bien « jamais vue », je dirais « crémaillère » (e.g., jugement de source), et si enfin on me demande à quel point j'en suis certain de l'avoir rencontré lors de cette crémaillère sur une échelle de 1 à 6, où 6 représente le niveau de certitude le plus élevé (e.g., échelle de certitude), je répondrais peut-être 3. En vérité, il se peut que je n'aie jamais rencontré ce visage ! Et dans ce cas, la familiarité était produite car mon esprit l'avais associé à une personne de mon entourage sur la base d'une similarité perceptive des caractéristiques du visage. De plus, il se peut également que ce soit effectivement la personne de mon entourage que j'avais rencontrée lors du festival et non celle que je viens juste de croiser dans la rue St-Catherine. Cet exemple illustre donc deux phénomènes qui peuvent nous pousser à faussement reconnaître une

personne sur la base d'un sentiment de familiarité : la similarité et l'interférence contextuelle (dans laquelle un contexte stocké en mémoire sera associé à un stimulus qui ne possède pourtant pas de contexte, puisqu'il n'a jamais été vu auparavant !).

### 2.1.1. Différentes types de fausses reconnaissances

A partir de cet exemple, on peut dégager la définition d'une fausse reconnaissance (FR) comme étant un phénomène se produisant lorsqu'un item (dans l'exemple précédent il s'agissait d'un visage) est incorrectement reconnu comme ayant été rencontré auparavant alors qu'en réalité ce n'est pas le cas (Thompson, 1988). Selon Thompson, cette définition est corollaire de la définition de la reconnaissance considérée comme étant le fait de juger un item comme ayant été précédemment rencontré. Cependant, comme le montre l'exemple précédent, on peut également associer un contexte incorrect à un item. Et, cette forme de FR est directement corollaire de la définition de la reconnaissance comme étant un jugement porté sur un item comme ayant été vu à un lieu ou un moment bien particulier. Mais contrairement à la fois précédente, il se peut qu'en fait j'aie déjà rencontré le visage précédemment. Dans ce cas, je peux encore commettre des fausses reconnaissances. Selon Thompson, si je considère la reconnaissance comme étant un processus *d'identification perceptuelle*, je peux de manière corollaire incorrectement identifier ce visage comme appartenant à Paul alors qu'en réalité il est celui de Pierre, de la même manière que je pourrais faussement identifier une forme (ou un ensemble de lettres) particulière comme étant un visage (ou un mot) alors qu'il s'agit d'une forme tout à fait abstraite (ou un pseudo-mot) en réalité. Je peux également encore une fois associer un contexte incorrect à ce visage que j'avais déjà vu en réalité dans un autre contexte (e.g., un autre lieu). Enfin, il faut aussi mentionner une dernière forme de fausse reconnaissance où la similarité n'est plus perceptuelle, mais plutôt conceptuelle (de nature sémantique), dans laquelle un item n'ayant pas été vu précédemment est incorrectement reconnu comme ayant été vu juste parce qu'il est sémantiquement associé à un item déjà vu, ou bien un item est incorrectement associé à un contexte juste parce que le contexte et l'item présentent un lien sémantique. Selon Schacter & Dodson (2001), ces FR sont des distorsions de la mémoire, des imperfections desquelles nous sommes victimes dans notre vie quotidienne.

### 2.1.1.1. Les fausses reconnaissances perceptuelles et conceptuelles

Ces différentes formes de FR ont été expérimentalement mises en évidence dans le laboratoire, mais pour la plupart en prenant des listes de mots comme matériel à apprendre, dans la lignée d'Ebbinghaus. Dans la catégorie des FR perceptuelles des mots par exemple (*perceptual false recognition*), la similarité perceptuelle peut se situer au niveau de la sonorité des mots, impliquant donc une similarité phonologique, ou bien au niveau de la forme des mots, impliquant une similarité orthographique (Cramer & Eagle, 1972 ; Garoff-Eaton, Kensinger, & Schacter, 2007 ; Nelson & Davis, 1972). Dans ces études, les mots présentant une similarité phonologique ou bien orthographique étaient bien sûr faussement reconnus comparés aux mots sans lien phonologique ou orthographique. De la même manière, il a été montré qu'un mot sémantiquement associé à un mot cible mais qui n'a jamais été présenté lors de la phase d'étude est très fortement reconnu comme étant un mot cible, produisant ainsi une fausse reconnaissance conceptuelle (*conceptual false recognition*) ou encore fausse reconnaissance sémantique (*gist-based false recognition*). Ce phénomène a été d'abord mis en évidence par Deese (1959) dans une tâche de rappel, puis repris par Roediger & McDermott (1995), en utilisant une procédure bien spécifique, devenu le paradigme de Deese-Roediger-McDermott (ou DRM) concernant plutôt la reconnaissance. Dans ce paradigme, la procédure est la suivante : une liste de mot est présentée aux sujets lors de la phase d'étude. Plus tard lors de la phase test, ces sujets sont soumis à une tâche de reconnaissance classique de type « Oui/Non » dans laquelle ils doivent décider si le mot a été vu précédemment ou pas. Parmi les mots tests, les cibles sont mélangées avec des leurres sémantiques, c'est-à-dire des mots distracteurs qui présentent un lien sémantique avec les mots cibles, mais qui n'ont par définition jamais été vus lors de la phase d'étude. Ces leurres sémantiques sont également appelés « leurres critiques » en raison de la convergence des mots cibles vers l'item critique qui serait activé dans le réseau sémantique (par exemple, *lit*, *couverture*, *drap*, et *pyjama* sont fortement reliés à *oreiller*, et ce dernier sera alors faussement reconnu comme étant une cible), raison pour laquelle ce paradigme est également appelé *paradigme des associés convergents*. En général, ce type de paradigme produit un niveau de fausses reconnaissances sémantiques très élevé pour les leurres critiques comparé aux leurres qui ne présentent aucun lien avec les cibles (Fazendeiro, Winkielman, & Luo, & Lorah, 2005, exp. 1A). Cet effet est également valable pour des images (Fazendeiro et al., 2005, exp. 1B). Cet effet reste robuste pour des leurres présentés dans une langue différente de la langue maternelle des participants

(Fazendeiro et al., 2005, exp. 2), et même lorsque le format du matériel (visuel vs. auditif) est changé entre la phase d'étude et la phase test (Gallo, McDermott, Percer, & Roediger, 2001).

#### 2.1.1.2. Le « *Misinformation effect* » et les fausses reconnaissances de source

Il faut également mentionner deux autres catégories de fausses reconnaissances, qui traduisent la manifestation de fausses mémoires par suggestion, et plus précisément par « implantation » pour l'une et par une lacune de l'association entre l'item et le bon contexte pour l'autre. Dans le premier cas, l'implantation de la fausse mémoire se fait en trois étapes : dans la première étape, les sujets sont visuellement exposés à un fait divers (e.g., un policier tue un homme dans la rue à l'aide d'un revolver), dans la deuxième étape, une partie des sujets est exposée verbalement à une information déformée (*post-event information*) par rapport à l'information initiale (e.g., un policier tue un homme dans la rue à l'aide d'un poignard). Dans la dernière étape, il est possible de demander aux sujets d'effectuer un rappel de l'événement ou bien une tâche de reconnaissance de type « Oui/Non » dans laquelle les items cibles (provenant de l'événement original, e.g., *revolver*) sont mélangés aux distracteurs (provenant de la description verbale, e.g., *poignard*). Les travaux princeps de Elizabeth Loftus et de ses collègues (e.g., Loftus, 1975, Loftus, Miller, & Burns, 1978) ont ainsi permis de montrer qu'une proportion très importante de sujets rappellent ou reconnaissent non pas l'item cible mais plutôt l'item distracteur qui représente l'information déformée. Cet effet est appelé *the misinformation effect*. Il est considéré que cet effet reflète le fait que l'information déformée à propos de l'événement va d'une manière ou d'une autre altérer la mémoire de l'événement initial. Alors que dans le paradigme DRM c'est un item jamais étudié mais présentant un lien sémantique qui est au centre d'une fausse mémoire, dans le paradigme de Loftus, il s'agit d'un item qui est remplacé par autre dans un contexte identique. Dans le second cas, au contraire, à chaque item correspond un contexte propre et les fausses mémoires seront dues au fait que la personne va en général avoir du mal à associer le bon item au contexte correspondant, appelé également source. Le fait de me demander si j'avais rencontré le visage à la crémaillère ou sur les quais lors du festival est un exemple d'un jugement de source dans lequel je vais tenter d'attribuer un item particulier (une personne, un visage) à une source potentielle (crémaillère, quais), impliquant que lors de la récupération de l'information j'effectue un *monitoring* (ou un contrôle) de la source (Johnson et al., 1993). Nous avons déjà décrit cette tâche typique d'attribution de la source. Si j'attribuais le visage au festival sur les quais alors qu'en réalité il a été antérieurement vu à la crémaillère, je serais victime d'une

fausse mémoire. Et plus précisément, lorsqu'une personne est soumise à une tâche de jugement de la source suite à une tâche de reconnaissance de type Oui/Non, elle commettra ainsi ce que l'on nomme une fausse reconnaissance de source (ou *source-based false recognition*). Selon Belli (1989), le point commun entre une FR due à une *misinformation* et une FR de type source est que dans les deux cas la mémoire de l'association entre l'item et le contexte est altérée, même si cette altération porte sur des aspects différents de l'association item-contexte. Il est également possible qu'une FR due à une *misinformation* puisse résulter d'une mauvaise attribution (ou *misattribution*) de la source lors du monitoring de la source (Loftus & Hoffman, 1988). Par exemple, la source de l'information « un policier tue un homme dans la rue à l'aide d'un revolver » est une image présentée sur un écran d'ordinateur alors que la source de l'information « un policier tue un homme dans la rue à l'aide d'un poignard » est une phrase lue sur une feuille blanche. Nous aurions également pu avoir une situation dans laquelle la première information a été entendue à la radio alors que la seconde ait été dite par une tiers personne, constituant encore une fois deux sources différentes. Par extension, en plus de ces deux situations produisant des fausses reconnaissances dont la cause semble être une défaillance dans le contrôle (ou le monitoring) de la source, une fausse reconnaissance sémantique peut également se voir comme une telle défaillance du mécanisme de monitoring entre une source externe (la liste étudiée) et une source interne (les associés activés dans le réseau sémantique) (Gallo, 2006).

### 2.1.1.3. La théorie de l'Activation/Monitoring

Cette position d'une défaillance du monitoring de la source est d'ailleurs largement défendue par Henri Roediger et David Gallo selon *la théorie de l'Activation/Monitoring* (Roediger, Watson, McDermott, & Gallo, 2001). Selon cette théorie, une FR sémantique est élicitée d'abord par un processus d'*Activation* qui représente en fait l'activation en mémoire sémantique de la représentation correspondante au leurre critique, qui du point de vue de la TDS est vu comme un signal. Le *Monitoring* correspond à tout processus décisionnel permettant de déterminer la source de la représentation activée (Gallo, 2010). Comme pour tous les processus qui ont été décrits dans le présent chapitre, cette théorie prédit que les FR doivent être sensibles à certaines manipulations lors de l'encodage et/ou de la récupération. Par exemple, concernant le processus d'activation, un traitement profond n'a pas forcément d'effet bénéfique en termes de baisse de la susceptibilité aux FRs, au contraire il augmente le taux de FR parce que l'attention est davantage portée sur les caractéristiques sémantique lors

de la phase d'étude (Thapar & McDermott, 2001). Mais par exemple la force d'association des items a également été fortement corrélée avec le taux de FR très important (Roediger et al., 2001), de même que le fait de présenter les items d'une liste « bloqués » par catégories sémantiques (McDermott, 1996). Ces résultats montrent que les FR sémantiques peuvent être générées aussi bien après un encodage intentionnel qu'incident des items (Dodd & McLeod, 2004), indiquant que le processus d'activation peut être explicite ou bien implicite (e.g., processus automatique de diffusion de l'activation parmi les associés sémantiques, Collins & Loftus, 1975 ; Underwood, 1965). Selon Gallo (2006), il existe deux formes de *monitoring*, le *monitoring de diagnostic* et le *monitoring de disqualification*. Le premier se réfère aux prises de décisions lors de la récupération qui sont basées sur ce que l'on attend d'un événement que nous avons vécu. Mes souvenirs d'un événement peuvent *ne pas comporter de détails épisodiques de recollection*, et je peux donc affirmer par exemple que « Je n'ai aucun souvenir de Pierre sur les quais, je me serais souvenu si j'avais rencontré Pierre sur les quais car c'est un amateur de vins et j'y avais bu du vin avec mes amis donc Pierre n'était pas là ». J'ai donc un souvenir d'avoir bu du vin qui n'était pas compatible avec la présence de Pierre. J'ai donc certainement vu Pierre lors d'une autre occasion. En revanche le *monitoring de disqualification* se réfère à une prise de décision par rapport à l'occurrence d'événements dont *j'ai une recollection* mais qui semble incompatible avec d'autres événements. Par exemple, « j'ai le souvenir d'avoir bu du vin sur les quais, donc je n'ai pas pu le boire ce jour-là et cette heure-là chez Pierre ». Ici c'était ma présence sur les quais qui était incompatible avec ma présence chez Pierre. Etant donné que j'ai du faire appel au souvenir de ma présence sur les quais pour rejeter ma présence éventuelle chez Pierre, ce type de *monitoring* est également appelé *recall-to-reject* (ou *recollect-to-reject*, équivalent aussi bien pour une tâche de rappel que de reconnaissance). Ces prises de décisions se basent donc essentiellement sur la qualité phénoménologique du souvenir. Par conséquent, ce qui peut influencer les caractéristiques phénoménologiques du souvenir aide aussi au *monitoring* de la source de ce souvenir : si les manipulations lors de l'encodage (e.g., niveaux de traitement) peuvent impacter la précision du souvenir (e.g., augmenter les FR), elles peuvent également les faire diminuer. Ainsi, le fait de coupler les mots de la liste avec une présentation sous forme d'images aide à réduire considérablement le taux de FR (Schacter, Israel, & Racine, 1999). Les auteurs ont développé le concept d'*heuristique de distinctivité* pour rendre compte de leurs résultats : les participants ont une recollection plus distinctive des items étudiés en raison de l'apport d'une présentation visuelle alors que cette distinctivité est absente des leurres sémantiquement reliés. Cette distinctivité permet alors d'effectuer plus facilement un *monitoring de diagnostic* en rejetant

correctement les leurres sémantiquement reliés qui n'élicitent par conséquent aucune recollection en termes de représentations imagées.

### 2.1.2. Neuropsychologie des fausses reconnaissances

Il est étonnant que très peu de recherches aient été menées sur le plan neuropsychologique concernant le *misinformation effect*, la plupart se concentrant surtout sur les implications légales notamment en ce qui concerne la mémoire de témoins, en d'autres termes la précision du témoignage (Lindsay, 2008). La nature même du paradigme qui vise à implanter une mémoire totalement fausse à laquelle le participant croit fermement pose certainement des questions éthiques quant à son utilisation dans l'investigation de ce type de fausse mémoire chez un certain nombre de patients. Cependant, étant donné la nature extrêmement malléable de la mémoire d'un événement mise en évidence par ce paradigme, des controverses très violentes sont nées de l'idée que bien des souvenirs traumatiques d'abus subits durant l'enfance seraient en fait le résultat d'un effet de « misinformation », autrement dit des faux souvenirs pouvant avoir été implantés même involontairement aussi bien par les proches, l'entourage, que le psychothérapeute lui-même (Coons, 1994 ; Loftus & Ketcham, 1994). Naturellement, une telle idée n'est pas nouvelle, car à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle Freud semble avoir touché du doigt ce type de suggestibilité en ayant eu recours au concept de *souvenir-écran*, qui désigne tout souvenir d'un événement vécu durant l'enfance mais rappelé en tant que souvenir faux ou distordu par les croyances, les désirs, l'état présent ainsi que l'environnement proche du patient, faisant ainsi « écran » à l'événement original (Freud, 1899). Toutefois, dans la mesure où il est impossible de connaître l'événement initial, il est également difficile de déterminer la véracité de la distorsion de tels souvenirs. Il a été récemment mis en évidence par contre que les personnes avec un faible niveau d'intelligence (e.g., mesurée à l'aide des matrices progressives de Raven et de l'échelle d'intelligence de Wechsler), et de faibles capacités perceptives et attentionnelles (e.g., test de « change blindness ») sont plus enclines à l'effet de « misinformation » (Zhu et al., 2010). En ce qui concerne la schizophrénie, de récentes études suggèrent malgré leur rareté, que les patients ayant ce trouble seraient plus susceptibles aux fausses mémoires de type « misinformation », un résultat qui serait compatible avec un signe clinique majeure caractérisant ces patients : le délire (Moritz & Woodward, 2006).

A l'opposé de l'effet « misinformation », un nombre considérable d'études ont été réalisées auprès de patients souffrant de conditions neurologiques et/ou psychiatriques



diverses à l'aide du paradigme DRM afin d'investiguer les FR sémantiques (ou *gist-based* FR). Par exemple, chez les patients présentant une amnésie de type Korsakoff, un résultat rapporté avec consistance est celui d'un faible taux de ce type de FR comparés aux contrôles lors du premier essai (Van Damme & D'Ydewalle, 2009), mais une augmentation accrue de ces FR lorsque la liste est répétée (Schacter et al., 1998). De même, une seule présentation de la liste d'items à mémoriser donne un taux très faible de FR sémantiques chez les patients souffrant de la démence de type Alzheimer mais un fort taux de FR non-reliés, cependant la répétition de la liste provoque chez eux une augmentation dramatique des FR sémantiques alors que le pattern inverse est observé chez les contrôles (Budson, Daffner, Desikan, & Schacter, 2000, Budson et al., 2002, exp.2). Ce type de résultat conforte l'idée que certains processus sémantiques automatiques, comme l'activation automatique des associés sémantiques, soient préservés chez ces patients, tandis que le traitement item-spécifique serait altéré expliquant un déficit de remémoration consciente des souvenirs. Ce même pattern a également été démontré chez les patients présentant des lésions au niveau du CPF (Budson et al., 2002, exp. 1), suggérant que la répétition des items lors des essais « liste-tâche de reconnaissance » permet aux contrôles de générer une recollection du souvenir basée à la fois sur les traitements item-spécifique et relationnel, à la base des processus de monitoring de diagnostic et de disqualification, tandis que les lésions frontales également présentes chez les patients Alzheimer et Korsakoff altèreraient cette capacité de monitoring, les obligeant à ne se focaliser que sur le traitement relationnel, qui lui aussi serait en fait également déficitaire. En effet, ces patients montrent le même effet de diminution du taux de FR perceptuelles pour des leurres d'images perceptuellement reliés aux images cibles (Budson et al., 2001) et pour des leurres présentant un lien phonologique avec la cible (Budson et al., 2003), suggérant que le déficit ne concerne pas spécifiquement la mémoire sémantique mais de manière plus générale le traitement relationnel, c'est-à-dire le traitement du « gist » (Budson, Todman, & Schacter, 2006). Il faut aussi mentionner un pattern quasi-similaire chez les patients souffrant de schizophrénie mais uniquement chez ceux qui présentent une forte tendance au délire (Bhatt, Laws, & McKenna, 2010).

Enfin, concernant les FR de source, les études auprès des patients montrent généralement un déficit du mécanisme de monitoring aboutissant à une mauvaise attribution de la source. Par exemple les patients Alzheimer montrent une altération du jugement de la source, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer si l'item a été présenté par une voix masculine ou féminine (Dalla Barba, Nedjam & Dubois, 1999 ; Mitchell, Sullivan, Schacter, & Budson, 2006). Les patients présentant des lésions du CPF ont également cette propension

à attribuer les mauvaises sources (e.g., le contexte spatial et temporel) aux faits récemment appris lors d'une tâche de reconnaissance (Janowsky, Shimamura, & Squire, 1989). Le cadre théorique du *source monitoring* (Johnson et al., 1993) permet d'expliquer ce type d'erreur d'attribution de la source : les patients arrivent à mieux mémoriser les faits que leur contexte parce que le binding des éléments n'a pas eu lieu ou a été altérée soit lors de la phase d'encodage soit lors de la phase de récupération. Selon cette théorie, un contrôle exécutif est également nécessaire afin d'effectuer un monitoring de la source, de ce fait un déficit du fonctionnement exécutif peut également aboutir à ces erreurs d'attributions (Dobbins, Foley, Schacter, & Wagner, 2002). Par conséquent, tout processus de monitoring de la source, peu importe le type de FR, impliquerait nécessairement la mobilisation d'un contrôle exécutif. Cette affirmation est d'ailleurs tout à fait corroborée par la plus grande sensibilité des patients présentant des lésions du CPF ainsi que les patients traumatisés crâniens aux FR, et notamment par leur plus grande propension à effectuer de mauvaises attributions de la source, notamment en utilisant des tests classiques tels que le CVLT (Baldo et al., 2002). Ce lien entre le monitoring et le contrôle exécutif dans tout processus de prise de décision quant à la source d'un fait appris ou mémorisé n'est d'ailleurs pas étranger au lien entre le processus de recollection et les processus contrôlés. En effet, la récupération correcte de la source d'un item nécessite nécessairement la récupération de l'association entre cet item et sa source, autrement dit cette récupération implique un processus de recollection. Or, nous avons vu précédemment que les patients souffrant aussi bien de lésions du LTM que du CPF manifestent un déficit mis en évidence par des tâches de récupération fortement « saturés » en recollection.

Cette caractéristique qui se manifeste en termes de mesure de la précision est donc également valable en termes d'erreurs : ces mêmes patients qui présentent par conséquent des lésions du MTL et du CPF et dont la recollection est altérée, ont de ce fait une performance très déficitaire (e.g., un niveau de bonnes reconnaissances bas surtout dans les tâches de RA) et sont plus susceptibles aux FR sémantiques, et aux FR de sources dues à un déficit du monitoring de la source. Les études de neuroimagerie faisant appel à l'IRMf semblent conforter cette conclusion (Dennis et al., 2008 ; Garoff-Eaton et al., 2007 ; Gutchess & Schacter, 2012).

## 2.2. L'oubli dans la mémoire épisodique

### 2.2.1. Interférence rétroactive

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'étude princeps d'Ebbinghaus (1895) a initié la théorie du déclin de la mémoire due au temps selon laquelle la trace mnésique une fois formée disparaît de la mémoire si elle n'est pas constamment réactivée, comme en témoigne la fameuse courbe de l'oubli dérivé de ses travaux. Ce type de point de vue a donc naturellement amené les chercheurs à étudier les conditions optimales d'apprentissage qui permettraient de transférer l'information de la MCT vers un registre de stockage à long terme (voir section 1). L'oubli en fonction du temps se caractériserait par une fonction puissance de la forme  $y = at^{-b}$  où  $y$  est la probabilité de rétention des items,  $t$  le paramètre temps (généralement l'intervalle entre la présentation des items et leur récupération),  $a$  et  $b$  des réels positifs (Wixted & Ebbesen, 1991 ; Wixted, 2004). Cependant, ce point de vue a été très vite confronté aux critiques d'auteurs tels que Müller & Pilzecker (1900), qui ont remarqué que de nombreux événements peuvent avoir lieu entre la fin de l'apprentissage d'une information et la phase de récupération. Ainsi émergea l'idée que les événements qui se produisaient entre la présentation du matériel à apprendre et la récupération de ce matériel peuvent avoir un effet délétère sur les performances de rappel. Et cette conception faisait également indirectement écho à l'idée de Joseph Delboeuf (1885) qui soutenait que l'oubli des informations apprises n'était pas provoqué par leur disparition avec le temps, mais bien parce qu'elles étaient temporairement rendues inaccessibles.

L'idée d'une interférence a d'ailleurs été reprise vers la fin du XX<sup>ème</sup> siècle ainsi que nous l'avons mentionné précédemment par Tulving à travers la distinction entre l'accessibilité et la disponibilité. Une information pourrait être inaccessible lors d'une tentative de récupération parce qu'elle subit une influence inhibitrice de la part des événements qui comblent l'intervalle de temps entre la présentation et le rappel. Ce type d'effet délétère est appelé « effet d'interférence », et plus précisément une *interférence rétroactive* (IR) dans la mesure où la récupération d'une information apprise va être détériorée par des événements ultérieurement vécus. Cette hypothèse est facilement testable à l'aide d'une procédure expérimentale classique dans laquelle deux groupes de sujets sont exposés aux mêmes stimuli durant la phase d'étude et à un rappel subséquent. Cependant, l'un des groupes constituera le groupe expérimental pour lequel l'intervalle de temps entre la phase d'apprentissage et la phase de rappel sera comblé soit par la présence d'autres stimuli soit par une tâche quelconque à effectuer. Si le groupe expérimental obtient des performances de rappel bien

moindres comparé au groupe contrôle alors cette altération des performances est imputée à la présence de ces stimuli ou de ces tâches. Cette procédure a été appliquée par nombre de chercheurs entre le début et la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle (e.g., Jenkins & Dallenbach, 1924 ; Müller & Pilzecker, 1900 ; Underwood, 1957). Dans la lignée de ce type de procédure, une méthode classiquement employée pour mettre en évidence cet effet d'IR utilise le paradigme d'apprentissage des paires de mot (Barnes & Underwood, 1959), dont le principe est le suivant : les sujets doivent dans un premier temps apprendre une paire de mots de type A-B, puis un groupe de participants apprennent également une paire A-C durant l'intervalle de rétention tandis que d'autres ne sont exposés à aucun stimuli durant cet intervalle ou bien à des tâches qui ne nécessitent nullement un apprentissage. Cet intervalle est dans une troisième étape suivi d'un test de rappel indicé pour lequel le mot A sert d'indice tandis que le mot B constitue la cible qui doit être rappelée. Ainsi, observe-t-on que le groupe qui a appris les deux types de listes A-B et A-C ont une mémoire ultérieure bien altérée des items B lors de la phase de récupération. Les tests de mémoire verbale tels que le CVLT permet aussi d'évaluer l'IR au moyen d'un paradigme d'apprentissage de liste de mots dans lequel les participants apprennent une première liste (liste A) durant cinq essais (voire section 1), puis une deuxième liste (liste B) immédiatement qui sert de liste interférente, suivie d'un rappel à court terme de la liste A (Delis et al., 2000).

L'interférence est considérée en générale de manière corollaire aux processus de récupération, justifiant notre choix d'en discuter dans cette partie (Anderson & Neely, 1996). En effet, il est présupposé qu'un phénomène d'interférence survient parce que l'accessibilité à l'information cible recherchée en mémoire va dépendre de manière substantielle de son association avec l'indice de récupération. Nous avons déjà décrit les différents aspects de l'association entre la cible et ce qui potentiellement pourrait constituer un indice de récupération dans notre section « encodage », comme nous l'avons également abordé dans la présente section en portant plus l'accent sur les tâches de reconnaissances associatives (RA) ou encore de la mémoire de la source car il s'agit d'une caractéristique centrale de la mémoire épisodique. Cependant, cet indice de récupération peut également être plus ou moins fortement associé avec d'autres informations. Par conséquent ces informations vont alors entrer en compétition avec l'item cible. De ce fait, plus l'association entre les autres informations et l'indice est forte plus leur capacité d'inhiber l'item cible sera importante (Anderson, Bjork, & Bjork, 1994 ; Müller & Pilzecker, 1900). Cette association peut être de nature perceptuelle, agissant aussi bien au niveau visuel que phonologique (Eakin & Smith, 2012), ou bien de nature sémantique (Levy-Gigi & Vakil, 2012). D'un point de vue théorique,

il n'est pas non plus illégitime de considérer que le « misinformation effect » décrit par Loftus soit en fait un exemple de la manière dont l'IR peut se manifester dans la vie quotidienne, puisque la récupération de l'événement original est altérée par un événement ultérieur (l'information déformée) (Marsh, Landau, & Hicks, 1996).

A ce jour, la seule étude à notre connaissance qui a tenté d'identifier le support neuroanatomique de cet effet d'IR a été menée par Wais, Rubens, Boccanfuso, & Gazzaley (2010). Ces auteurs ont utilisé une procédure dans laquelle les sujets étudiaient des images en ayant les yeux ouverts pendant l'intervalle entre la présentation et la récupération pendant lequel des images distrayantes étaient présentées, soit les yeux fermés afin de contrôler l'effet de la présentation de ces distracteurs. Les performances de rappel étaient nettement moins bonnes en termes de qualité du souvenir (e.g., détails visuels, processus de recollection) dans la condition expérimentale comparée à la condition contrôle. Cette diminution des performances était fortement associée à l'altération de la connectivité fonctionnelle impliquant le GFI gauche, l'HC et le cortex visuel associatif.

### 2.2.2. Interférence proactive

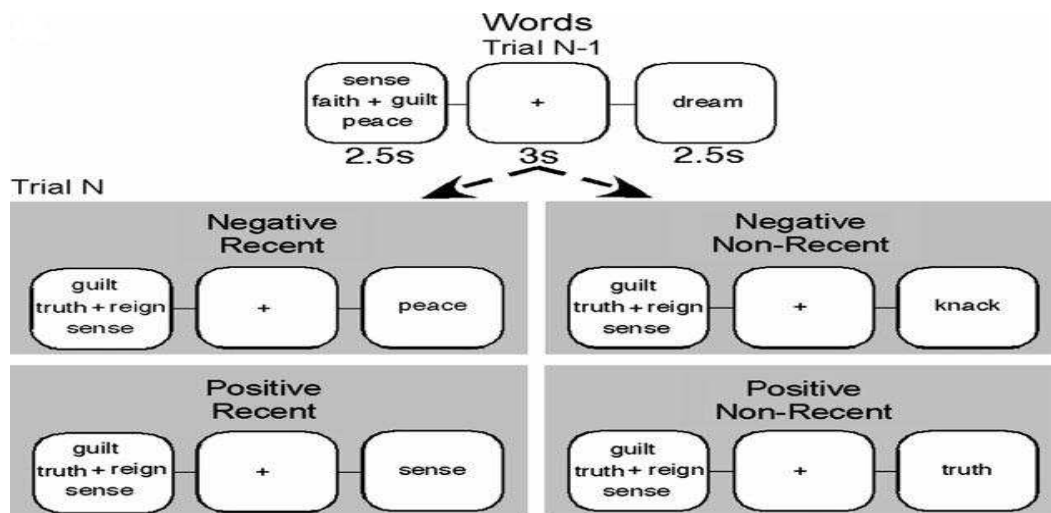
Ce fut au final Underwood (1957) qui remit en question l'idée d'une IR, et proposa un autre mécanisme d'interférence : l'*interférence proactive* (IP), basé sur l'observation de l'effet délétère de l'apprentissage d'une information sur la récupération d'une information ultérieurement apprise. Cependant, le mécanisme d'IR suscite toujours de l'intérêt parmi les chercheurs comme en témoignent les articles datant de la fin du XX<sup>ème</sup> siècle (e.g., Graf & Schacter, 1987) ainsi que des études plus récentes, datant du début de ce XXI<sup>ème</sup> siècle (Eakin & Smith, 2012 ; Köster, Degel, & Piper, 2002). L'IP s'observe le plus souvent soit par une performance de rappel diminuée pour la liste subséquente comparée au rappel de la première liste, soit par des intrusions de cette première liste dans le rappel de la seconde. De la même manière que pour l'évaluation de l'IR, le paradigme des paires de mots ainsi que le paradigme d'apprentissage des listes sont utilisés, l'un dans un contexte plus expérimental, l'autre dans un contexte plus clinique (e.g., le CVLT, Delis et al., 2000). Dans le premier cas, les patients apprennent une association de mots A-B suivi directement de la présentation de la liste A-C. Un rappel indicé est ensuite administré aux participants qui doivent répondre C lorsque A est présenté comme indice. Dans le second, une liste A est présentée aux sujets pour une phase d'apprentissage, suivi de la liste B, qui est en général sémantiquement reliée à

la première. L'effet d'IP est alors mis en évidence par le moins bon rappel de la liste B comparée à la liste A (Delis et al., 1988).

Etant donné le principe de compétitivité entre les items associés en mémoire et de la force d'association entre ces items B et l'indice de récupération, les items cibles C sont inhibés, et par conséquent rendus inaccessibles. On observe alors une diminution des performances de rappel des items C. Une autre manière d'expliquer l'effet d'IP, mais qui ne contredit pas le principe de compétitivité est de le considérer comme un déficit du processus de recollection basé sur le caractère distinctif des items appris, les sujets s'appuyant alors uniquement sur la familiarité. Cette distinctivité des items appris repose également sur le traitement item-spécifique qui serait altéré, les sujets ne se reposant alors que sur le traitement relationnel du à une focalisant de l'attention sur l'indice (Burns, 1989). Cependant, lorsqu'il s'agit d'un paradigme d'apprentissage de liste et qu'un rappel libre est utilisé contrairement à un rappel indicé, la théorie de Burns prédit que les participants se focalisent à la fois sur l'indice et la cible et non exclusivement sur l'indice, faisant ainsi appel aussi bien au traitement item-spécifique que relationnel (ce qui correspond également au fait que le rappel libre en soi inclus les deux type de traitements). Ce changement de stratégie pourrait produire de meilleures performances de rappel libre dans la liste B comparée à la condition contrôle dans laquelle soit la liste A n'est pas présentée soit les items de la liste A n'ont aucun lien sémantique avec ceux de la liste B, effet connu sous le terme d'*interférence proactive inverse* (Thapar, 1996). Ces points de vue théoriques sont également compatibles avec l'observation d'un effet d'IP lorsque les items des deux listes partagent une relation sémantique (Craig, Berman, Jonides, Lustig, 2013).

Enfin, il faut mentionner l'idée selon laquelle l'IP serait associé à un déficit du fonctionnement exécutif ou de la mémoire de travail (Kuhl & Wagner, 2009 ; Vanderploeg, Schinka, & Retzlaff, 2001). L'une des méthodes les plus utilisées pour déterminer le lien entre l'IP et le fonctionnement exécutif est l'utilisation de la tâche de « recent probes » qui est une variante de la tâche de reconnaissance de Sternberg (Figure 11) pour lequel l'un des résultats les plus intéressants est que la mémoire de travail semble jouer un rôle prépondérant dans la capacité de résoudre l'IP (Conway & Engle, 1994). Grâce à ce paradigme, il a été possible de montrer un effet d'IP non pas sur une tâche de rappel mais sur une tâche de reconnaissance, et non pas en mesurant la performance de rappel correcte ou bien le nombre d'intrusion mais une performance de reconnaissance correcte et le temps de réponse (TR). En général, l'effet d'IP se manifeste a) par une moins bonne performance de reconnaissances correcte ainsi qu'un TR plus long (Atkinson & Juolla, 1974 ; Badre & Wagner, 2005). En utilisant ce

paradigme spécifique, Thompson-Schill et al. (2002) ont pu montrer que malgré un déficit prononcé de la mémoire de travail, les patients présentant une lésion frontale manifestent un effet d'IP comparable à celui des contrôles, excepté lorsque cette lésion est localisée au niveau du GFI, qui fait partie du CPF ventro-médian. Leur patient R.C. manifestait en effet une susceptibilité accrue à l'IP aussi bien en termes de précision de la réponse que du temps. Cette observation est également corroborée par l'utilisation d'autres paradigmes tels que l'association des paires de mots (Shimamura, Jurica, Mangels, Gerschberg, & Knight, 1995) ou bien l'apprentissage par de multiples essais de rappel libre utilisés par les tests de mémoire verbale tels que le CVLT (e.g., Baldo et al., 2002 ; Numan, Sweet, & Ranganath, 2000). Le rôle prépondérant du GFI dans la résolution de l'IP a aussi été mis en évidence par des études de neuroimagerie (Mecklinger et al., 2003 ; Nelson et al., 2003).



**Figure 11.** Recent probe task. A l'essai N-1, un ensemble de stimuli (e.g., des mots) est présenté et constitue l'ensemble ancien, suivi d'un masque (e.g., une croix centrale) correspondant à l'intervalle de rétention, puis un item test (« probe »). Cet ensemble d'items doit être maintenu en mémoire de travail pendant l'intervalle de rétention jusqu'à ce que le sujet soit soumis à une tâche de reconnaissance de type Oui/Non. Cette procédure est répartie en quatre conditions à l'essai N: A) la condition « negative recent » dans laquelle un nouvel ensemble d'items est présenté, suivi du masque et de l'item test. L'item test issu de l'ensemble ancien (essai N-1) ne correspond pas (« negative ») à l'ensemble récent. B) la condition « negative non-recent » pour laquelle l'item test correspond ni à l'ensemble ancien ni à l'ensemble récent, C) la condition « positive recent » pour laquelle l'item test correspond aussi bien à l'ensemble ancien (positive) qu'à l'ensemble récent (« recent »), et enfin D) la condition « positive non-recent » pour laquelle l'item test ne correspond pas à l'ensemble ancien mais à l'ensemble récent. Comparé à la condition B), l'effet d'IP est mis en évidence dans la condition A) pour laquelle le sujet répond que « peace » faisait partie de l'ensemble récent (réponse « Oui ») alors qu'il faisait partie de l'ensemble ancien. Adapté de Badre & Wagner (2005).

### 3. Phénoménologie de la récupération épisodique

#### 3.1. L'ecphorie synergétique

Afin de rendre compte du fait que le rappel peut se faire sans reconnaissance, Tulving (1983) utilise le principe de l'ecphorie synergétique. Ce concept décrit le processus par lequel une récupération de type épisodique, c'est-à-dire une récupération consciente d'un événement

indexé selon son contexte spatial et temporel, ne peut se faire sans la combinaison de la trace mnésique antérieure et de l'indice de récupération généré par le contexte. Une ecphorie est tout à fait synonyme du terme récupération (*retrieval* en anglais). On doit l'invention de ce terme à Richard Wolfgang Semon (1923), un psychologue et biologiste de l'évolution. Semon (1923, p. 179) a défini l'ecphorie en ces termes:

*“The ecphory of an engram should be understood as being its passage from the latent to the active state or, in other words, the arousing of a condition of excitation (= sensation), which has remained as a permanent, though locally dormant, alteration in the sensitive substance of an organism.”<sup>1</sup>*

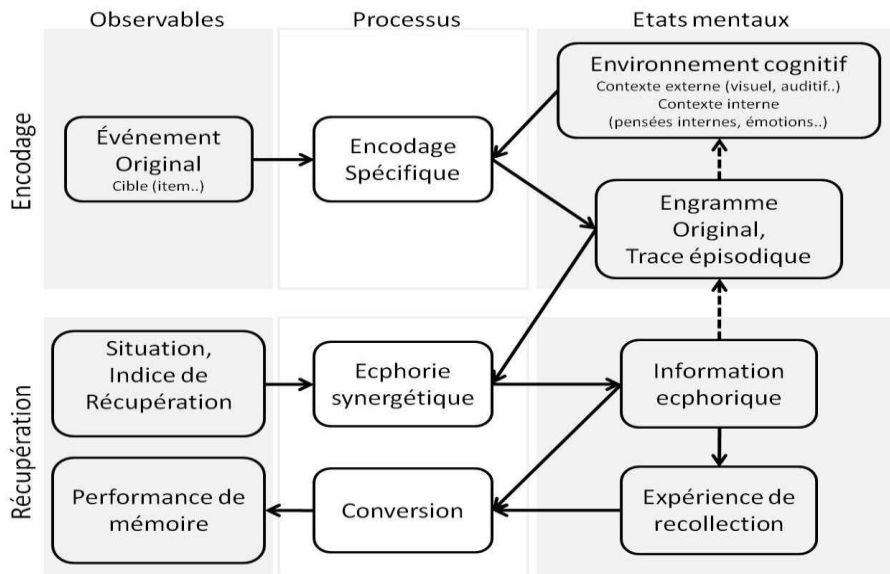
Pour illustrer ce concept, imaginons que je rencontre un ami dans la rue, soudain il me rappelle que je dois aller délivrer un bouquet de fleurs à ma tante. Pourquoi ? Parce que l'ami en question tenait justement un bouquet de roses. Selon le principe de l'ecphorie, le bouquet a agi comme un indice de récupération de la trace mnésique de l'intention que j'avais mémorisé (celle d'aller apporter le bouquet). L'une des implications de ce principe est le fait que cet indice de récupération peut être externe, comme le bouquet, comme interne, par exemple, je pense à un bol de lait et cela me fait rappeler le bon Noël que j'avais passé chez moi l'année dernière, rendant compte d'une récupération involontaire et rapide. Mais ce principe peut également rendre compte d'une récupération plus lente, nécessitant plus d'effort attentionnels, de recherche dans la mémoire épisodique de traces mnésiques en l'absence d'indices évidents. Cet exemple illustre la différence entre l'accessibilité et la disponibilité. En effet, une information peut être disponible dans la MLT, mais tant que l'ecphorie n'a pas eu lieu, elle ne sera pas accessible, rendant compte par exemple de la difficulté du rappel libre par rapport à la tâche de reconnaissance. Mais il est également possible que cette différence entre l'accessibilité et la disponibilité rende aussi compte de la différence de performances qui existe entre une tâche RI de type Oui/Non et une tâche de RA (dans la mesure où celle-ci et la tâche de rappel libre sont jugées équivalentes en termes de processus impliqués, e.g., recollection). Bien que ce concept d'ecphorie soit voisin de celui de spécificité d'encodage, ils ne portent pas l'attention sur les mêmes aspects de la mémoire : le premier met plus l'accent sur la récupération tandis que le second plus sur l'encodage. Néanmoins, tels qu'ils sont décrits au sein du modèle GAPS (*General Abstract Processing System*, Tulving, 1983), ils ont

---

<sup>1</sup> A ce jour, cette œuvre majeure de la psychologie de la mémoire n'a pas encore été traduite en langue française bien que ces écrits remontent au début du siècle dernier ! L'auteur de la présente thèse propose la traduction suivante : « L'ecphorie d'un engramme devrait être compris comme étant son passage d'un état latent à un état actif ou, en d'autres termes, la manifestation d'une excitation (= une sensation) qui, bien qu'elle soit jusqu'alors restée latente, représentait toujours une altération permanente de la substance sensitive d'un organisme ». Le terme d'engramme, qui est grossièrement équivalent à celui de trace mnésique et familier à tous ceux qui étudient la mémoire, est également une invention de Richard Semon.



en commun cette relation intime entre les conditions d'encodage et de récupération et le fait que des éléments contextuels peuvent constituer des indices de récupération (Figure 12). A partir de cette observation, d'autres principes régissant la récupération directement dérivées de l'ecphorie peuvent être mis en exergue. Dans la section sur l'encodage contextuel, nous avons vu que la mémoire épisodique est formée par l'association entre l'item et le contexte, mais pour former un souvenir épisodique complet, avec la richesse de détails visuels et des éléments qu'il comporte, il a fallu associer plusieurs éléments durant l'encodage qui pouvaient être non seulement de nature spatiale et temporelle, mais aussi visuelle et émotionnels, brouillant la distinction entre le contenu et le contexte. Par exemple, je me promenais avec un ami à la plage, je me rappelle des vagues et de leur son, des enfants qui pataugeaient dans l'eau, du marchand de glaces ambulant et de la sensation de chaleur qui se propageaient sur mes épaules alors que le soleil était au zénith. Ce « binding » entre les éléments a une conséquence importante sur la récupération de cet épisode : je me sers de chacun de ses éléments comme indices pour récupérer les autres ! c'est un processus de récupération que McClelland et al., (1995) appellent le *complètement de patterns*. Ce principe général s'applique, à partir de cet exemple de la vie quotidienne, à des tâches de laboratoire plus contrôlées comme le rappel indicé ou encore le paradigme des paires associées typiquement utilisé pour montrer la spécificité de l'encodage. De plus, même si l'encodage et la récupération sont deux processus distincts, les associations entre les items et leurs contextes servent également à former des souvenirs épisodiques dans laquelle ces associations sont conservées, illustrant ainsi le principe de *réinstanciation* (« recapitulation » en anglais, Rugg, Johnson, Park, & Uncapher, 2008). Selon ce principe, le pattern d'activations des représentations de l'encodage, et de manière corollaire, celui des régions cérébrales, vont être « réinstanciés » durant la récupération.



**Figure 12.** Modèle GAPS de Tulving (1983).

### 3.2. “retrieval attempt”, “retrieval mode”, and “retrieval success”

Dans la littérature déjà très dense sur la récupération des informations en mémoire épisodique, il faut enfin mentionner la mise en évidence de mécanismes spécifiques qui font référence au processus de récupération en soi. Ces mécanismes recouvrent bien évidemment tout ce qui a été rapporté jusqu’à présent dans cette partie intitulée « récupération », mais également des réflexions générées à partir des découvertes sur les études examinant diverses caractéristiques de la récupération. Ces études ont pu différencier notamment 4 mécanismes relatives à la récupération : 1) la tentative de récupération, 2) le mode de récupération et 3) la récupération réussie. Au-delà des études comportementales, ces notions sont surtout investiguées dans les études de neuroimagerie (Tulving et al., 1994a,b ; Rugg et al., 1998).

Nous avons abordé la notion d’ecphorie synergétique qui met en relation l’indice et l’item lors de la récupération. La « récupération réussie », qui se mesure comportementalement par de bonnes performances de rappel et/ou de reconnaissances, implique en termes de mécanismes que le souvenir épisodique ait été restitué avec les détails visuels, auditifs, émotionnels, et autres, sans oublier que le souvenir sera le reflet de l’association entre cet indice de récupération et l’item cible qui aura été apprise (e.g., binding) et consolidée en mémoire à long terme. Ainsi, cette notion de récupération réussie sous-entend que le sujet ait fait l’expérience d’une recollection. D’un point de vue phénoménologique, une récupération réussie implique que cette recollection soit directement dépendante de ce que Tulving (1983) nomme la chronesthésie, c’est-à-dire la capacité que

nous avons de « voyager mentalement dans le temps » afin de revivre de manière vivace les événements passés, tout comme l'oncle Scroodge de Dickens. Le fait que nous puissions ainsi effectuer un retour dans le passé, et savoir que ces souvenirs nous appartiennent dans la mesure où nous sommes les sujets qui les avons vécus et non quelqu'un d'autre en première instance, est une propriété fondamentale de la récupération épisodique selon Tulving (1983), correspondant à un état de conscience associé ainsi à l'expérience recollective lors d'une récupération épisodique, nommée « conscience auto-noétique ». C'est à cet état de conscience bien spécifique auquel Tulving fait référence lorsqu'il utilise le terme de « retrieval mode ». Sans ce mode de récupération, il ne peut y avoir une récupération « réussie ». La procédure Remember/Know est une manière d'aborder objectivement cette conscience auto-noétique (Gardiner, 2001) et permettrait aussi d'aborder ses bases neurobiologiques. Selon Wheeler, Stuss, & Tulving (1997), le CPF jouerait un rôle prépondérant dans l'expérience de « remembering », et par truchement dans l'activation de la conscience auto-noétique. Par exemple, un déficit de la récupération consciente, caractérisé par une baisse notable des réponses « R », est associé à un hypométabolisme dans le CPF antérieur médian et le CPFDL gauche entre-autres dans la variante comportementale de la démence fronto-temporale (Bastin et al., 2012).

Le terme de *retrieval attempt*, qui est également utilisé de manière interchangeable avec le terme de *retrieval effort*, dénote une tentative de récupération, ou encore l'effort associé à la tentative de récupération. La tentative de récupération se caractérise généralement par une recherche active de l'information en mémoire, dans laquelle le sujet s'engage par exemple dans une tâche de rappel libre pour laquelle il ne dispose d'aucun indice de récupération externe, comparé à une tâche de rappel indicé ou une tâche de reconnaissance. Ainsi, lorsque le rappel aboutit à une réponse incorrecte, le sujet peut continuer à chercher en mémoire les items qui constitueraient des candidats potentiels (Frackowiak, Friston, Frith, Dolan, 2004). Comparée à une tâche de rappel libre, cette stratégie de recherche aurait moins lieu dans une tâche de reconnaissance lorsque la tentative de récupération n'aboutit à aucune réponse ou bien une réponse différente de celle recherchée. Par conséquent, derrière cette notion se cachent donc des concepts tels que « ressources attentionnelles », « charge cognitive » ou encore « processus contrôlés ». Par exemple, selon Rugg & Wilding (2000), l'effort de récupération est défini comme étant le niveau de ressource de traitement associé à une tentative de récupération, c'est-à-dire à cette recherche active. Cette ressource attentionnelle est nécessaire car le rappel se fait en trois étapes, la première consistant à générer les items candidats, la deuxième à reconnaître le ou les bons, et la troisième à évaluer

(dans le sens « monitor ») la réponse (Fletcher & Henson, 2001). Ainsi, l'une des manières d'évaluer la tentative de récupération est d'observer les modulations de l'activité cérébrale lorsqu'un sujet effectue des tâches de récupération dont le niveau de difficulté varie. Par exemple, les items ayant engagé un traitement superficiel demanderait naturellement plus d'effort lors du rappel comparé à un traitement profond, et cet effort est directement observable en utilisant une technique de neuroimagerie appropriée telle que l'IRMf (Buckner et al., 1998). Ces auteurs ont d'ailleurs identifié une activité accrue dans le CPFDL gauche comme témoignant de ce rappel « effortful ».

Le mode de récupération ou « retrieval mode » est un concept inventé par Tulving (1983) afin de décrire un état cognitif qui non seulement initie la récupération consciente, mais qui est maintenu tout au long de la tentative de récupération et de la récupération réussie. Un certain nombre de principes régissent hypothétiquement ce processus tels que : a) selon la définition, les corrélats neuroanatomiques du mode de récupération doivent être mis en évidence lors de l'initiation de la tâche de récupération quelle qu'elle soit, comparée à une tâche qui ne nécessite pas la récupération, toute chose égale par ailleurs ; b) Ce mode doit être mis en évidence spécifiquement pour une tâche de récupération épisodique comparé à une tâche de récupération non-épisodique (e.g., récupération sémantique). Là encore, les études ont pu identifier l'activation du CPF (Lepage et al., 2000). L'aire BA 10 en particulier supporterait ce processus de mode de récupération (Nyberg et al., 1995).

**Encart 1 : Synthèse permettant la Lecture des indicateurs de mémoire à travers la distinction « item-spécifique vs. Relationnel »**

La mémoire épisodique est évaluée à travers divers processus concernant aussi bien l'étape d'encodage, de stockage que celle de récupération. Ces processus ont pu être mis en évidence en laboratoire, mais aussi en clinique notamment grâce à l'élaboration de tests et de procédures adéquats comme le paradigme de rappels libres multi-essais. Nous avons vu que pour chacun d'eux la distinction « traitement item-spécifique vs. Relationnel » pouvait être appliquée. Initialement proposée par Einstein et Hunt (1980), cette distinction est largement reprise dans les modèles neurobiologiques contemporains propose pour l'élaboration d'une trace mnésique de dissocier deux types de traitements complémentaires.

-Le traitement item-spécifique est un ensemble d'opérations de spécification et d'extraction de traits d'un événement, il privilégie les dimensions très spécifiques de l'information cible telle qu'une propriété définitionnelle (eg., Cible-canari ; indice spécifique : jaune). Il peut aussi être défini comme le traitement distinctif de l'information.

-Le traitement item-relationnel est un ensemble d'opérations de généralisation catégorisant, structurant, configurant, liant plusieurs événements sur la base de traits communs, de similitudes (perceptives, sémantiques ou contextuelles). Il se concentre souvent sur les dimensions générales et abstraites telle qu'une propriété d'appartenance catégorielle moins discriminante (eg., Cible- canari ; indice général : oiseau) (Hunt & Smith, 1996).

Ces deux types de traitements opèrent sur les caractéristiques perceptuelles, sémantiques ou contextuelles portées par le ou les événements. Un fonctionnement optimal de la mémoire reposerait sur ces deux types de traitements conférant une « distinctivité » à chaque événement vécu (en anglais, « the distinctiveness of an event is the processing of differences in the context of similarity », Hunt, 2006, p.12) et une intégration de ce dernier dans les connaissances pré-existantes de l'individu (i.e., mise en relation).

Le tableau ci-après propose une synthèse des différents indices de mémoire identifiés comme étant associés à chacun de ces traitements (Hunt, 2006 ; Sauzéon, 2010), (Tableau 3).

**Tableau 3.** Indicateurs de traitements item-spécifique et relationnel.

<b>Traitements item-spécifiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nombre de mots rappelés en rappel libre</li> <li>-Nombre de mots gagnés entre deux essais de rappel (effet d'apprentissage)</li> <li>-Performances en reconnaissance</li> </ul>
<b>Traitements Relationnels</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nombre de mots rappelés en rappel libre</li> <li>-Nombre de mots perdus entre deux essais de rappel</li> <li>-Performance en rappel indicé</li> <li>-Indices d'organisation des items rappelés</li> <li>-Effet d'interférence proactive et rétroactive</li> </ul>

## Chapitre II

### *Mémoire quotidienne et validité écologique*

Jusqu'à présent, nous avons abordé la mémoire épisodique de manière spécifique, aussi bien dans une perspective théorique qu'empirique. Cependant, ces études ont pour la plupart adopté la longue tradition d'études contrôlées dans un environnement « stérile » du laboratoire, inaugurée par Ebbinghaus, connues sous le terme de « recherches traditionnelles de laboratoire ». Ces études ont apporté et apportent des éclairages extraordinaires sur la manière dont fonctionne la mémoire mais ces éclairages ne sont-ils pas spécifiques aux tâches utilisées en laboratoire ? Autrement dit, nous renseignent-ils sur le fonctionnement de la mémoire dans la vie quotidienne du sujet ? Neisser (1978), à qui l'on doit le terme *psychologie cognitive*, fut le premier à affirmer la nécessité d'intégrer l'étude de la mémoire dans ses aspects utiles (dirigés par un but) et situés au sein des activités de la vie quotidienne de l'individu afin d'augmenter la *validité écologique* des modèles élaborés en laboratoires. Mais alors, quelles peuvent être les procédures écologiquement valides pour étudier la mémoire ? Peuvent-elles refléter la manière dont la mémoire fonctionne dans la vie quotidienne ? Quels types ou mécanismes de mémoires sont mobilisés dans nos activités quotidiennes ? Ces questions sont au centre des débats opposant vivement les tenants de la recherche traditionnelle de laboratoire (e.g., Banaji & Crowder, 1989) aux tenants de l'approche écologique, voire naturaliste (e.g., Conway, 1991), mais très vite, des approches mixtes sont suggérées : il faut étudier la mémoire dans un contexte écologique sans compromettre le contrôle expérimental (Ceci & Brofenbrenner, 1991). Bien évidemment, le concept de *everyday memory* que l'on pourrait traduire par « mémoire quotidienne » est au centre de ces débats. Depuis récemment, l'approche mixte est en pleine expansion, notamment, grâce aux technologies de la réalité virtuelle proposant des simulations contrôlées de situations proches de la vie réelle.

#### **I. Qu'est-ce que la mémoire quotidienne ?**

Aujourd'hui, on peut affirmer que les contours scientifiques de ce concept ne sont pas clairement définis. En effet, il suffit de taper « everyday memory » sur google ou bien sur les moteurs de recherches spécialisés tels que *PubMed*, *Ebscohost* ou encore *Scencedirect* pour

se rendre compte de la diversité des articles utilisant ce concept mais aussi de la diversité dans la manière de l'aborder scientifiquement, de l'opérationnaliser. Cette diversité donne à la fois l'impression d'une grande richesse thématique et didactique dans l'abord scientifique de la mémoire quotidienne et d'un manque de repères théoriques: ces études ne donnent pas une définition claire et précise de ce qu'est la mémoire quotidienne. Cette remarque a été déjà faite en 1996 par Cohen, de la seconde édition de son livre « *Memory in the real world* » (p. 7). La troisième édition de ce livre (Cohen & Conway, 2008) essaye d'y remédier en proposant les bases théoriques de la mémoire quotidienne. Selon Cohen (2008), la *mémoire quotidienne* est définie très simplement comme étant la manière dont la mémoire est utilisée dans les activités quotidiennes des personnes, notamment celles dirigées vers un but. Comme en témoigne la synthèse brillante de ce livre, la mémoire quotidienne peut être abordée sous différents angles (e.g., théoriques, empiriques, et méthodologiques) et concerne différentes facettes de la vie quotidienne. Par exemple, la mémoire prospective concerne, dans notre vie quotidienne, l'encodage, la rétention et la restitution des intentions d'effectuer des tâches ou des activités ultérieurement, et de ce fait, prend également en compte l'exécution proprement dite de cette activité/tâche (McDaniel & Einstein, 2007). La mémoire retrospective des actions performées (Engelkamp, 2001), la mémoire spatiale (Moscovitch, Nadel, Winocur, Gilboa, & Rosenbaum, 2006), la mémoire autobiographique, qui concerne la mémoire des faits et événements vécus sur le plan personnel, impliquant la conscience de soi (Conway & Pleydell-Pierce, 2000), et bien entendu la mémoire épisodique. De ce point de vue, la mémoire quotidienne est avant tout une mémoire intégrée au sein d'un contexte, et définie du point de vue des activités quotidiennes du sujet contrairement aux tâches artificielles de laboratoires. Mais elle peut également être abordée du point de vue du matériel auquel est exposé le sujet dans son environnement quotidien comme les journaux, la radio, la télévision, les objets divers qui composent les meubles et les fournitures dans les maisons et les pièces des bâtiments, les visages, les noms des personnes, les animaux, ou bien encore de leur relations spatiale avec d'autres objets, avec le sujet ou avec le référentiel terrestre. Une troisième voie possible est d'étudier la relation de ce qui constitue les phénomènes mentaux de la vie de tous les jours variant en termes de niveau de conscience avec la mémoire, tels que les croyances naïves et populaires sur la mémoire, les supports métacognitifs de la mémoire, l'imagination et les rêves (Cohen & Conway, 2008 ; Magnussen & Helstrup, 2007).

Appréhender l'un de ces trois aspects de la mémoire quotidienne oblige dans tous les cas à établir une méthodologie éprouvant la validité écologique des résultats recueillis.

## 1. La mémoire quotidienne du point de vue de la validité écologique

Bien qu'aujourd'hui le terme de mémoire quotidienne soit préféré, le terme de « mémoire écologique » est également utilisé afin de mettre en avant le fonctionnement de la mémoire dans un environnement naturel (Bruce, 1985). La validité écologique des tests psychométriques est une question d'importance critique notamment, dans le domaine de la neuropsychologie. En effet, les cliniciens sont amenés, dans de nombreuses situations d'évaluation, à évaluer et prédire le fonctionnement quotidien du patient et par conséquent, à prédire si ce patient pourra par exemple de nouveau retourner au travail et/ou accomplir un certain nombre d'activités (pour une revue, voir Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). Cette capacité prédictive des tests neuropsychologique peut également s'avérer essentielle dans la proposition d'un diagnostic précoce d'une démence chez les personnes âgées (e.g., démence de type Alzheimer, Rabin, Wang, Katz, Deryn, Buschke, & Lipton, 2012). De manière générale, la validité écologique correspond au degré avec lequel les résultats obtenus sur les procédures expérimentales contrôlées en laboratoire sont associées au fonctionnement d'une personne dans la vie quotidienne (Tupper & Cicerone, 1990). Ainsi, dans la mesure où les performances à un test neuropsychologique renseignent le clinicien ou le chercheur sur le fonctionnement du sujet dans la vie quotidienne, il possède une validité écologique. Chaytor & Schmitter-Edgecombe (2003) définissent deux approches permettant d'aborder la validité écologique : l'approche véridique (ou *véridicalité*) et l'approche vérisimilaire (ou *vérisimilitude*). La première concerne purement une relation de nature statistique entre les performances obtenues sur le test et les performances obtenues sur d'autres tests, questionnaires ou échelles évaluant le fonctionnement quotidien tandis que la seconde concerne très spécifiquement le degré avec lequel les processus cognitifs évalués par une procédure expérimentale ou bien un test reflètent ceux mobilisés dans les activités quotidiennes (Franzen, 1989). Une évaluation écologique de la mémoire peut ainsi être abordée selon l'une ou l'autre des approches.

### 1.1. L'étude de la mémoire quotidienne basée sur la véridicalité

Une manière d'étudier ou d'évaluer la mémoire quotidienne est d'utiliser des questionnaires d'auto-évaluation. La plupart de ces questionnaires d'auto-évaluation font appel à la capacité de métacognition (plus spécifiquement de métamémoire) (Hertzog & Hultsch, 2000) avec notamment des mécanismes d'évaluation de son propre fonctionnement



qui à eux seuls incluent une cascade de mécanismes peu fiables tels que les mécanismes de raisonnement évaluatif (e.g., diagnostic) basés sur les connaissances de l'individu et donc sujets aux distorsions subjectives, aux stéréotypes sociétaux, etc. (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). En effet, ces questionnaires posent des questions qui demandent un effort de jugement de la part du participant de sa propre capacité de se rappeler des objets, des activités, des situations, etc. Même si en général, une échelle de type Lickert est utilisée afin de mesurer la performance subjective du participant, il existe différentes mesures. Par exemple, certains questionnaires demandent aux sujets de juger la qualité de sa mémoire en termes « très mauvaise, mauvaise, assez bonne, plutôt bonne, bonne, et très bonne » tandis que d'autres demandent de juger la fréquence de l'oubli ou de la récupération réussie, ou bien en termes de difficulté/facilité de la récupération. On peut en citer quelques un dans ce cas, tels que Prospective and retrospective memory questionnaire (PRMQ, Crawford et al., 2006), Subjective Memory Questionnaire (SMQ, Levy & Powell, 2011) ou encore le Questionnaire d'auto-évaluation de la mémoire (Clément, Belleville & Gauthier, 2008). Pour une liste plus exhaustive des questionnaires et plus de détail sur leur mode d'administration, ainsi que les données normatives voir Lezak et al. (2004).

Dans la mesure où ces questionnaires donnent une description de situations quotidiennes, il est supposé qu'elles ont une validité écologique. Par conséquent, il est également supposé que si les évaluations traditionnelles de la mémoire épisodique sont significativement corrélées à ces questionnaires, alors elles ont une bonne validité écologique. Si c'est effectivement le cas, ces tests traditionnels acquièrent alors en toute légitimité le pouvoir de prédire le fonctionnement quotidien. Or, un manque de relation statistique linéaire est quasi-systématiquement constaté entre les performances obtenues sur ces tests traditionnels et celles obtenues sur les questionnaires (voir Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003, pour une revue). A cela, deux hypothèses explicatives majeures sont proposées : la première étant bien entendue le manque de validité écologique des tests traditionnels (voir Schultheis & Rizzo, 2001 pour une revue), et la seconde étant les biais inhérents aux questionnaires (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003).

En effet, la plupart des questionnaires sont limités à des questions qui mettent en général plus l'accent sur la réussite ou l'échec de la mémoire correspondante à des situations quotidiennes (e.g., *vous arrive t-il d'oublier à quel endroit vous avez rangé vos lunettes ? Vous arrive t-il d'oublier le fil de vos idées ou bien d'une conversation ?*). Or, cette technique peut être avantageuse car elle peut renseigner sur la pertinence des processus évalués en laboratoire si des questions plus en rapport avec des processus sont posés. Par exemple, un

questionnaire pourrait demander au sujet de juger la fréquence avec laquelle *il oublie ce à quoi il pensait après qu'une situation ou une personne l'ai interrompu dans sa tâche* (ici on peut très bien évaluer la sensibilité à l'interférence rétroactive), ou bien de juger si leur capacité d'organiser les choses est bonne ou mauvaise stratégie sur une échelle de Lickert (e.g., *pensez-vous être organisé(e) dans vos tâches ou activités quotidiennes ? ou cette organisation a-t-elle une incidence sur votre capacité à retrouver les objets, un chemin, à retenir un rendez-vous ?, ...*). Ces questions peuvent ensuite être corrélées avec des tests classiques de mémoire verbale. Cependant, malgré leur grande variété, ce type de questionnaire n'existe pas actuellement à notre connaissance.

De manière générale toutefois, ces questionnaires semblent refléter le fonctionnement quotidien de la personne dans la mesure où les sujets sont amenés à juger leur mémoire à partir de descriptions de situations naturelles. Cependant, plusieurs obstacles majeurs, pouvant constituer des biais de réponse, sont à noter. Selon le modèle à quatre étapes de Tourangeau (1984) ces descriptions sont avant tout verbales, et demandent de la part du sujet 1) non seulement une compréhension verbale de la question mais aussi dans un second temps, 2) un « voyage mental dans le temps » pour récupérer la mémoire épisodique des situations décrites ; en une troisième étape 3), « évaluer » si ces souvenirs correspondant à l'état de la mémoire décrit par le questionnaire et enfin dans une quatrième étape, de juger si dans cette situation sa mémoire était bonne ou mauvaise, déterminant la réponse consciente du sujet (voire Jobe, 2003 pour une revue des autres modèles de processus cognitifs impliqués dans les réponses aux questionnaires). Cette chaîne fonctionnelle implique (Tourangeau, 1984) :

*i)* une personne qui souffre d'un déficit de la mémoire épisodique pourrait ne pas se rappeler (i.e., recollection) de telles situations même si elle reconnaît (i.e., familiarité) avoir déjà été dans ces situations, typiquement celles qui présentent des lésions frontales et/ou médio-temporales. Ces personnes seraient donc logiquement défaillantes sur les trois autres étapes conduisant à la réponse aux questions, puisque le modèle de Tourangeau considère ces étapes de traitement comme sérielles. Au mieux, la réponse ne dépasserait donc pas le niveau du à la chance ;

*ii)* les personnes présentant plus particulièrement des lésions frontales seraient défaillantes lors de la phase de monitoring et de jugement, donc au niveau de tout processus impliquant la métamémoire.

*iii)* les personnes souffrant d'aphasie de compréhension ne peuvent clairement pas répondre aux questionnaires ;

*iii*) les questions peuvent ne pas être très claires, résultant en un décalage entre ce que le chercheur voudrait mesurer et ce que le sujet interprète (Galesic & Tourangeau, 2007), et enfin,

*iiii*) la réponse de certains patients peut refléter d'autres troubles liés soit à la mémoire soit à la métamémoire tels que le déni ou bien la méconnaissance des déficits mnésiques (e.g., anosognosie).

L'ensemble des obstacles *i*), *ii*), et *iiii*) dans la réponse au questionnaire constitue ce que Cohen appelle le Paradoxe de la Métamémoire (Cohen, 2008). Ces obstacles seront également abordés dans le chapitre suivant concernant plus particulièrement le vieillissement.

## *1.2. L'étude de la mémoire quotidienne basée sur la vérisimilitude*

L'approche vérisimilaire consiste à adopter des procédures d'évaluation, qu'elles soient cliniques ou expérimentales, visant à simuler soit une activité complexe de la vie quotidienne, soit à fournir aux sujets un matériel qu'ils rencontrent ou utilisent souvent dans leur vie quotidienne. Parmi les tests neuropsychologiques qui ont clairement opté pour cette approche afin d'étudier différents aspects de la mémoire quotidienne, on peut citer le Rivermead Behavioral Memory Test (RBMT, Wilson, Cockburn, & Baddeley, 1985) ou le Contextual Memory Test (CMT, Toggia, 1993). Le RBMT évalue la mémoire de divers composantes de la vie quotidienne, telles que la mémoire de noms et prénoms, la mémoire des objets nous appartenant, la mémoire prospective des rendez-vous, la reconnaissance des images, la mémoire des histoires, la mémoire des visages, des routes, des messages, la mémoire de l'orientation spatiale et temporelle, et la mémoire de la nouveauté.

D'un point de vue plus fondamental, les travaux issus de la théorie de la segmentation de l'événement illustrent avec éloquence l'approche verisimilaire du fonctionnement de la mémoire dans un contexte quotidien.

### *1.2.1. Event Segmentation Theory*

Selon la théorie de la segmentation de l'événement (ou Event Segmentation Theory, Zacks & Swallows, 2007), les personnes ont tendance à segmenter un événement global en divers événements discrets lorsqu'ils l'observent et pour lesquels une représentation, un modèle mental spécifique sera formé. Ces modèles sont ensuite associés, intégrés pour former la représentation globale de l'événement. Ces modèles discrets nécessitent donc d'un événement global à l'autre, une mise en jour afin de constituer une limite nette, une frontière

entre deux événements (Kurby & Zacks, 2011 ; Zacks & Swallow, 2007). Cette segmentation possède certaines propriétés. Par exemple, elle suit une certaine logique, une certaine organisation qui permet de reconnaître ensuite l'événement global et donne ainsi une signification à l'événement, permettant de le relier à la mémoire sémantique. Selon Zacks et al. (2006), il s'agit également d'un processus automatique, dépendant directement de processus perceptifs. Dans une étude très récente menée par cette même équipe (Bailey et al., sous presse), les participants regardaient un film décrivant un homme préparant le petit déjeuner, un autre préparant des décorations pour une soirée, et un troisième acteur recherchant un livre dans une bibliothèque. Pour chacune de ces activités, les participants devaient appuyer sur la barre d'espace du clavier afin de les segmenter en événements plus petits. La segmentation devait se faire lorsqu'au sein d'un événement global (e.g., préparer le petit déjeuner), le sujet pensait pouvoir déterminer une « unité significative », c'est-à-dire une sous-tâche ayant une signification (e.g., verser le café dans la tasse et ajouter du sucre constitue une unité, mais lorsque l'acteur commence à manger son croissant, cela constituerait une autre unité significative, voire la figure 15). Suite à la visualisation du film, les sujets devaient effectuer un rappel libre verbal consistant à décrire la scène (le rappel correct était noté comme le nombre d'unités correctement rapportées), une tâche de reconnaissance à choix forcé, et enfin une tâche de reconnaissance du décours temporels des unités significatives constituant chaque événement global qui consistait à réarranger les photographies de ces unités dans le bon ordre. Grâce à cette procédure, ils ont pu constituer une mesure composite de segmentation et une autre de mémoire quotidienne. Les régressions ont montré que les performances de segmentation prédisaient de manière significative celles de mémoire quotidienne. Dans leur étude, les auteurs ont ainsi pu montrer que les patients présentant une DTA pouvaient avoir une performance de mémoire quotidienne relativement déficitaire s'ils n'avaient pas réussi à décomposer les événements en unités significatives. Ces performances ont également été prédites par le volume du LTM, suggérant que celui-ci, et notamment l'HC serait responsable du processus de décomposition des événements en unités significatives, ce qui conforte aussi la théorie du *Item-to-Context Binding* (Diana et al., 2007). Cela suppose donc que l'HC permet la ségrégation de différents événements, permettant ainsi de se souvenir de chacun d'eux comme étant un événement séparé.



**Figure 13.** L'événement « mettre une tente » est décomposé en 6 événements discrets ou « unités significatives » pour lesquelles les frontières sont nettement définies. Ces frontières permettent donc de constituer une suite logique de l' « histoire » (adapté de Zacks & Swallow, 2007).

Il se peut que la décomposition des événements en unités significatives, ou processus de segmentation, soit fortement influencée par l'encodage de la relation entre les objets, mais aussi entre l'agent qui effectue l'action et les objets, déterminant par conséquent une certaine organisation spatiale des événements. C'est ce que suggère une autre étude déterminée par l'esprit de la vérisimilitude (Hayes, Ryan, Schnyer, & Nadel, 2004), dans laquelle les participants visualisaient un court film montrant une visite de quatre maisons dans lesquelles étaient disposées des objets. Les sujets étaient ensuite testés sur leur mémoire de ces objets, mais également sur leur mémoire de la localisation spatiale de ces objets ainsi que sur l'ordre dans lequel ces objets et ces lieux ont été visités par une tâche de reconnaissance à choix forcée (i.e., on présente deux objets visuellement l'un à côté de l'autre, et le sujet doit répondre lequel des deux a été vu pendant la phase d'étude). Conformément aux résultats relatés dans le chapitre précédent, cette étude a montré une activation du CPFDL de manière équivalente pour la mémoire de la localisation des objets et celle de l'ordre temporel. De manière intéressante, les TR des sujets mesurés lors de la tâche de reconnaissance spatiale et de reconnaissance temporelle étaient équivalents, mais plus long par rapport au TR de la reconnaissance des objets. Cette dernière en revanche activait plutôt le cortex pariétal bilatéral. Mais l'HC n'était spécifiquement activé que pour la mémoire de la localisation des objets.

### 1.2.2. La mémoire épisodique de l'action

Les précédents travaux place le sujet comme un spectateur des événements qu'il vit, qu'il observe ; autrement dit, le sujet expérimente passivement les événements qu'il vit. Cependant, le sujet peut aussi être actif, c'est-à-dire acteur des événements qu'il vit, comme cette femme qui prépare une tente (figure 15). Est-ce que la mémoire d'un événement vécu en « observateur » est différente de celle vécu en « acteur » ? C'est ce que porte à croire les études menées sur le rôle que joue la motricité, ou plutôt la composante cognitive de la motricité, l'*action*, dans la formation de la mémoire épisodique : la mémoire des actions.

Il s'agit d'une mémoire complexe, car au final quoi que nous fassions dans notre vie quotidienne, nous sommes amenés à les rendre significatifs en termes d'activités ou de tâches, et ce sont ces tâches/activités que nous avons accomplies qui sont ensuite remémorées. Si vous demandiez à votre ami comment s'est passé son rendez-vous, il est fort probable qu'il vous le décrive en termes de ce qu'il a fait avec cette fille qu'il avait rencontré au café (« nous sommes allés dans un bar où je lui ai improvisé un morceau des Rolling Stones à la guitare »). Dans l'étude de Bailey et al. (sous presse), il s'agissait également de la mémoire des actions mais celles qui étaient performées par autrui. Tout un pan de la recherche dans ce domaine a par exemple montré que énoncer les actions aboutit à une meilleure performance de mémoire. Ce sont notamment les études menées par Zimmer et Engelkamp et leurs collègues (voir Engelkamp, 2001 pour une revue). Dans un paradigme élaboré par leurs soins, une partie des sujets peuvent étudier une liste de phrases représentant la relation entre un verbe d'action et l'objet de cette action (e.g., il faut MANGER une POMME), tandis que l'autre moitié des sujets énoncent l'action « manger la pomme » (condition *performer*) sur commande verbale. Ce type de procédure a montré que le second groupe avait de meilleures performances de rappel comparé au premier (Zimmer & Krumnacker, 1980). Ces auteurs ont appelé cet effet, *enactment effect*. Cohen (1983), ayant répliqué cet effet, l'a appelé *effet SPT (Subject Performed Task)*. Cet effet a ensuite été répliqué de nombreuses fois (e.g., Engelkamp & Zimmer, 1996 ; Zimmer, 1991). Cet effet a été démontré sur la tâche de reconnaissance (Nyberg, Nilsson, & Bäckman, 1991) et semble spécifique aux actions performées car les performances sont également meilleures comparées à des actions imaginées (Guttentag & Hunt, 1988) ou bien performées par autrui (Koriat, Ben Zur, & Druch, 1991). Récemment, il a été montré que l'effet SPT n'améliore pas la mémoire de la source (Hornstein & Mulligan, 2004). Kormi-Nouri (1995) a suggéré que performer l'action permettait l'intégration du verbe et du nom de l'objet au sein d'une même représentation cohérente (voir, *l'hypothèse du*

*processus d'unification*, Staresina & Davachi, 2010), permettant ainsi de mieux rappeler l'un ou l'autre. En fait, l'explication dominante de l'effet SPT repose sur la distinction entre processus item-spécifique et relationnel (Einstein & Hunt, 1980) (distinction présentée en *infra* dans le Chapitre I).

Engelkamp et Zimmer proposent que performer une action augmente le traitement item-spécifique. En effet, cet effet SPT prévaut uniquement pour le couple verbe-objet (Guttentag & Hunt, 1988), ce qui n'est pas le cas pour le rappel libre des objets pris isolément des verbes (Denis, Engelkamp & Mohr, 1991). De manière plus directe, performer une action en soit augmenterait le traitement item-spécifique, de manière à rendre cette action bien distinctive d'une autre action, et *a fortiori*, d'une liste de phrases. Le lien entre le traitement item-spécifique et le processus de distinctivité a déjà été mis en évidence (Hunt, 2012, pour revue). Il semblerait donc que performer une action permet une meilleure mise en place du processus de recollection à travers l'augmentation de la distinctivité, et diminuerait la familiarité (Engelkamp & Dehn, 1997).

### 1.3. Les facteurs déterminant la vérisimilitude

Cependant, il faut noter que ces tests ou ces procédures expérimentales ne sont pas tous nécessairement écologiquement valides même s'ils manifestent une ressemblance physique avec la situation naturelle qu'ils sont sensés simuler. En effet, la validité écologique ne se limite pas à une ressemblance physique du test ou de la procédure avec la situation naturelle, que Franzen & Wilhelm (1996) appelle la « similarité topographique » ou ce qu'on appelle également *validité faciale* (Anastasi, 1988), c'est-à-dire une appréciation subjective de la correspondance physique entre le test et la situation naturelle qui peut se manifester de bien des façons (e.g., par une similarité physique, par le sentiment de confort que le sujet ressent à travers l'utilisation d'un matériel écologique, ou bien par la similarité des l'état de conscience ou des processus mentaux impliqués dans le test et la situation naturelle). Par exemple, le test de conduite nécessite l'utilisation d'un volant, ce qui paraît plus naturel et peut être plus confortable pour le commun des gens que d'utiliser une manette de Nintendo, mais un entraînement pourrait neutraliser l'effet d'inconfort et donner des résultats similaires en termes de performances de conduite à une conduite réelle, montrant leur validité écologique similaire. Un autre exemple serait le fait de demander à des participants d'étudier l'association entre le nom et le visage, une situation que nous rencontrons souvent dans la vie quotidienne lorsque nous faisons pour la première fois connaissance avec des gens. Mais cela

ne garantie par pour autant que ce test soit écologiquement valides, il faut tenir compte aussi bien du contexte dans lequel cette association est apprise dans la vie quotidienne mais aussi de la manière dont elle est apprise. Par exemple, compte tenu de l'effet de la supériorité des images sur du matériel verbal (Paivio, Rogers, & Smythe, 1968), nous nous rappelons la plupart du temps mieux du visage que du nom isolément l'un de l'autre. Or nous améliorons souvent notre mémoire de cette association, en diminuant petit à petit la différence entre les deux modalités, au fur et à mesure de la répétition de la rencontre avec la personne en question, un peu à la manière d'une répétition des stimuli dans le contexte d'un laboratoire. Un tel exemple selon certains auteurs (e.g., Tse, Balota, & Roediger, 2010) peut donner une validité écologique à des paradigmes traditionnels de la présentation liste-rappel libre au cours de multiples essais. Ainsi, si au départ le sujet considérait l'association entre le nom et le visage comme laborieux car il s'agissait de deux stimuli de nature différente, au bout du compte un processus d'unification permettra de voir le nom et le visage comme étant un seul stimulus global diminuant par là-même la mobilisation des ressources de traitement (*Hypothèse du processus d'unification*, Staresina & Davachi, 2010). Mais d'un autre côté, ce processus d'encodage de l'association (e.g., *binding*) se fait souvent de manière incidente, implicite, ce qui peut diminuer la validité écologique d'un test évaluant la mémoire de l'association nom-visage si les consignes spécifient un encodage intentionnel, comme c'est le cas pour la plupart des tests de mémoire verbale (i.e., le CVLT ou bien le test de Grober & Buschke, 1987). Cette diminution de la validité écologique pourrait être déduite du fait que les performances de reconnaissances de l'association nom-visage ne sont pas les mêmes selon le type d'encodage en utilisant le même paradigme : intentionnel (Sperling, Chua et al., 2003) vs. incident (Chua, Schacter, Rand-Giovannetti, & Sperling, 2007). Même si cette équipe n'a pas directement comparé ces deux types d'encodage, il est intéressant de voir que l'encodage intentionnel aboutit à 66 % de reconnaissance associative correcte de la paire nom-visage alors que l'encodage incident n'aboutit qu'à 62 % de reconnaissance associative correcte. Cette différence peut aisément se superposer aux résultats que ces deux études rapportent quant aux bases neuroanatomiques de la récupération de l'association nom-visage : l'encodage incident n'implique que la portion antérieure de la formation hippocampique tandis que l'encodage intentionnel implique en plus de celle-ci l'activation du GFI (gyrus frontal intérieur, dont le rôle éminent dans la récupération a été montré aussi bien dans l'encodage que la récupération épisodique, voir *infra*, chapitre I). Cette mobilisation additionnelle de CPF dans la récupération de l'association nom-visage pourrait donc refléter la mise en place de processus stratégiques de nature exécutive lors d'un encodage



intentionnel. Ces résultats font également écho au comportement des personnes âgées quant à la mémoire « nom-visage » : elles montrent une diminution des performances de récupération de la paire nom-visage aussi bien dans une condition d'encodage incident qu'intentionnelle, mais les déficits sont majorés dans la seconde, qui fait appel à des processus stratégiques (Naveh-Benjamin, Shing, Kilb, Werkle-Bergner, Linderberger, & Li, 2009), mais nous y reviendrons dans le chapitre 3, qui porte spécifiquement sur le vieillissement de la mémoire épisodique et quotidienne. Négliger cette différence peut amener à effectuer de fausses inférences sur le fonctionnement de la mémoire épisodique « nom-visage » dans la vie quotidienne, surtout dans le domaine de la neuropsychologie : ces résultats suggèrent par exemple que les personnes âgées pourraient en fait très bien s'en sortir avec les noms et les visages dans la vie quotidienne contrairement à ce que les tests de mémoire verbale nous montrent surtout si l'encodage n'est pas intentionnel. Le manque de validité écologique dans ce cas porterait sur la majoration des déficits mnésiques sur ces tests.

La réalité virtuelle, que nous abordons spécifiquement dans la section suivante, constitue une voie prometteuse d'études des processus cognitifs, permettant de coupler les deux types d'approches de la validité écologique sans pour autant sacrifier le contrôle expérimental.

## **II. La réalité virtuelle : un outil au service de l'approche vérisimilaire**

La réalité virtuelle (RV), est une technologie qui permet de reproduire un monde réel, imaginaire ou symbolique avec des degrés de fidélité et de réalisme divers (Fuchs, 2006). Il s'agit en fait d'environnements simulés par ordinateur. Ce terme a été inventé par Antonin Artaud, poète et homme de théâtre français. En effet, la première utilisation de ce terme est trouvée dans son chef-d'œuvre *Le Théâtre et son double* (Artaud, 1938). Dans les années 30, les ordinateurs et les environnements visuels simulés en 3D n'existaient pas encore, cependant l'essence de ce qu'est la réalité virtuelle fut d'ors et déjà comprise. Artaud, dont la réflexion portait sur le théâtre et l'imaginaire, les considérait comme une réalité virtuelle dans la mesure où il s'agit d'un « Double » de la réalité. Mais cette réalité du théâtre est en perpétuel mouvement, dont les formes sont éphémères, changent et s'évanouissent encore plus vite que la réalité elle-même, d'où sont caractère virtuel. Cette réalité est une transformation<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Artaud faisait d'ailleurs le parallèle avec l'alchimie, qui est en quelque sorte le double de la réalité dans le sens où tout y est interprété comme appartenant à une autre réalité faite uniquement de symboles, où la transformation était le pivot philosophique d'une réalité physique en une réalité mystique « Tous les vrais alchimistes savent que le symbole alchimique est un mirage comme le théâtre est un mirage. Et cette perpétuelle

## 1. Caractéristiques de la réalité virtuelle : immersion, présence, interaction

Selon Slater (2003) *l'immersion* est « ce que la technologie délivre d'un point de vue objectif », et par conséquent ne concerne que les moyens technologiques mis en place pour isoler l'utilisateur ou le sujet le plus possible du monde réel et de diriger son attention uniquement sur l'environnement virtuel (EV) et la tâche à effectuer dans cet environnement. Historiquement, le concept d'immersion a été proposé par Ivan Sutherland en 1965. L'immersion sous-entend donc que l'utilisateur fasse totalement partie intégrante du système matériel de la réalité virtuelle, tout comme l'acteur s'intègre dans la scène (Usoh & Slater, 1995). Pour ce faire, l'une des conditions est que l'utilisateur ne voit que l'EV peut importe le changement de position de la tête, et que ce changement corresponde en temps réel aux changements de directions visuelle dans l'EV.

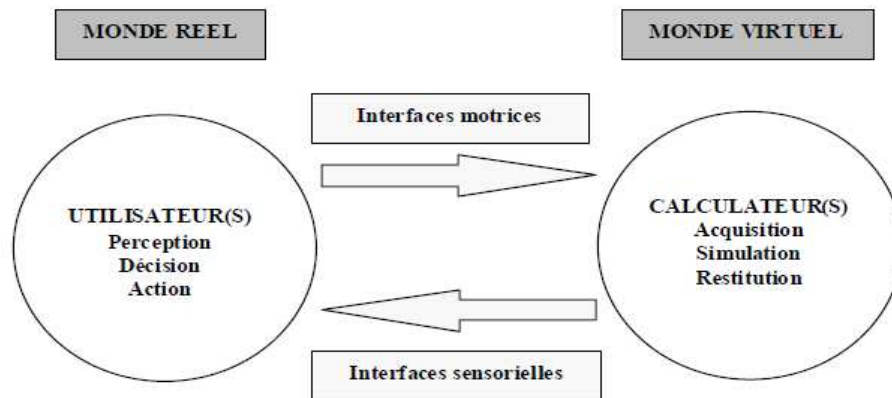
Un concept qui dérive directement du précédent est celui de *présence*. Celle-ci relève non pas d'un support matériel externe contrairement à l'immersion, mais plutôt d'un support psychologique. En effet, la présence est définie comme étant un état de conscience généré par un bon niveau d'immersion et se manifeste par la sensation d'« être là » (Usoh & Slater, 1995). Slater la définit en fait comme une propriété émergente de l'immersion (Slater, 2003). De nombreux paramètres qui influencent l'immersion, peuvent influencer en conséquence la présence. Par exemple, un mouvement virtuel rapide ou bien en décalage (e.g., le lag) avec le mouvement attendu peut rapidement diminuer l'immersion, et par là-même le sentiment de présence, c'est-à-dire le sentiment de faire partie intégrante de l'EV, tout comme le sentiment qu' a l'acteur d'« incorporer » son personnage.

Dans une perspective qui met en évidence des relations entre le monde physique, le monde virtuel et l'être humain, une définition très pragmatique de la RV est de permettre *l'interaction* du sujet réel avec le monde virtuel, et de ce fait de multiplier les possibilités d'émergence de comportements certes virtuels, mais observables et analysables (Fuchs et al., 2006). Cette interaction est rendue possible grâce à la mise à disposition d'interfaces sensori-motrices mais aussi grâce aux propriétés de calcul et d'infographie qui sous-tendent cette interaction telles que la perception du mouvement soit fluide et se fasse en temps réel. Ainsi,

---

allusion aux choses et au principe du théâtre que l'on trouve dans à peu près tous les livres alchimiques, doit être entendue comme le sentiment (dont les alchimistes avaient la plus extrême conscience) de l'identité qui existe entre le plan sur lequel évolue les personnages, les objets, les images, et d'une manière générale, tout ce qui constitue la *réalité virtuelle* du théâtre, et le plan purement supposé et illusoire sur lequel évoluent les symboles de l'alchimie. » (Artaud, 1938, p. 49)

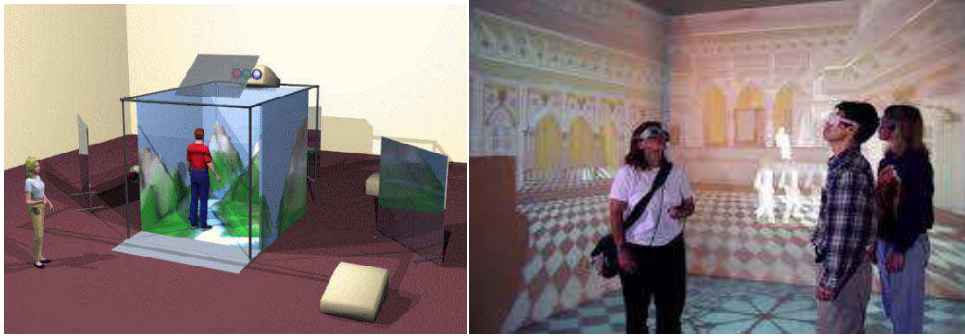
deux types d'interfaces permettent cette interaction : les interfaces sensorielles et les interfaces motrices.



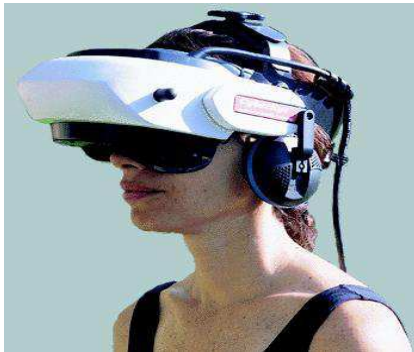
**Figure 14.** Boucle perception, action, cognition (adapté de Fuchs et al., 2006).

Selon la définition établie par Fuchs et al. (2006), l'utilisateur humain qui se trouve dans le monde réel perçoit le monde virtuel grâce à l'interface sensorielle (e.g., l'écran permettant d'afficher la simulation en 3D de l'environnement virtuel, pour d'autres exemples voir, Figures 15,16) et change les paramètres physiques de cet environnement virtuel (EV) en utilisant une interface motrice (e.g., le joystick pour se déplacer, voir d'autres illustrations en Figure 17, 18). L'interface sensorielle va prendre en compte les signaux transmis par l'interface motrice dans le calcul (également appelé interface de transfert par Bowman, Gabbard, & Hix, 1996) qui va dans un premier temps consister à acquérir le signal, puis dans un deuxième temps à le traiter. Le traitement du signal va rendre compte de la modification des paramètres physiques (e.g., augmentation de la vitesse de déplacement dans l'EV) selon le modèle d'interaction de Fuchs et al. (2006). À travers cette interaction, l'utilisateur va mettre en place la boucle perception-action et générer une activité cognitive de la même manière que dans un environnement réel (ER).

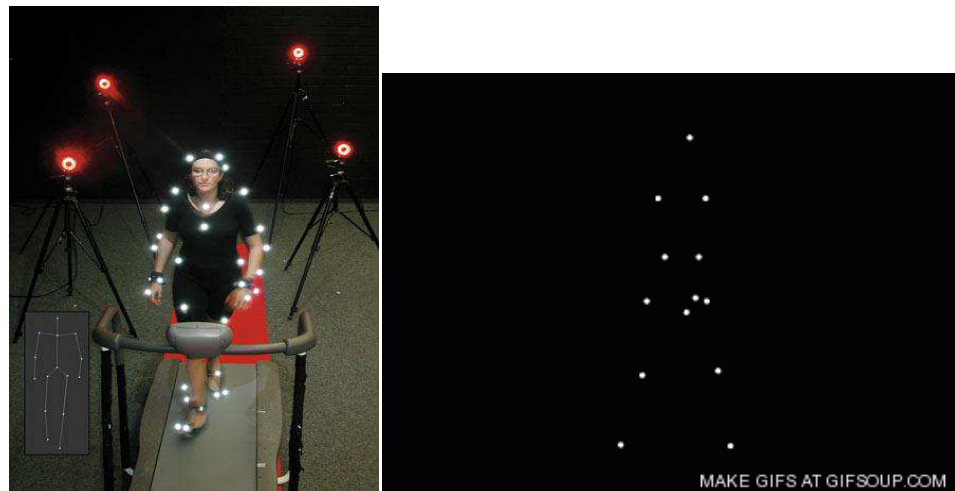
Une variété d'interfaces motrices sans retour de force existe, allant du simple bouton d'un clavier d'un ordinateur aux cybergloves, en passant par la souris, le joystick, les tapis roulants et les volants, tous variant en complexité d'interaction. Les uns étant des interacteurs « user-friendly », c'est-à-dire offrant un confort d'utilisation tel que sa manipulation paraît naturelle et peu coûteuse en ressources cognitives (e.g., un bouton, un joystick ou un volant), les autres moins confortables et nécessitant un apprentissage (e.g., table de navigation). Dans les deux cas, les interfaces peuvent symboliser des mouvements réels dans le EV, on parle alors de *métaphores du mouvement* (Cirio, Vangorp, Marchal, Lecuyer, & Drettakis, 2012).



**Figure 15.** Le système CAVE. Reproduit avec la permission de Van Mensvoort (<http://www.nextnature.net/2008/12/enjoying-nature-in-the-cave/>). Exploration d'un temple virtuel à l'aide du CAVE à l'université d'Etat d'Iowah, USA. Reproduit avec la permission de Whitney Sanford et de David Kolb.



**Figure 16.** Le visiocasque appelé aussi HMD (Head Mounted Display, littéralement *dispositif monté sur la tête*). Un HMD est un casque composé d'un capteur de position de la tête et de petits écrans placés au niveau des yeux. Le capteur de position de la tête permet d'intégrer les changements de point de vue de l'utilisateur lors de son exploration de l'EV en temps réel tandis que les écrans permettent de présenter le rendu en temps réel de l'EV en fonction du mouvement de la tête de l'utilisateur, correspondant à un feedback visuel. L'utilisateur, ou le sujet, peut ainsi avoir la sensation qu'il contrôle son exploration du monde virtuel. Casque HMD general reality CE-200W. Photo : General Reality Corp.



**Figure 17.** Dans la figure de gauche, un sujet marchant sur un tapis dans le laboratoire BioMotionLab du Dr. Troje à l'Université du Queen, ON, Canada. Les points lumineux permettent de reconnaître le mouvement de locomotion vue de profile dans la figure de gauche. Image de gauche disponible à l'adresse suivante : <http://www.oit.on.ca/Pages/SSstories61-80/StoryQueen'sTroje.html>. L'image de droite disponible à l'adresse suivante : <http://gifsoup.com/view/1507044/biological-motion.html>.



**Figure 18.** Gant à retour de force, monté en tant qu'exosquelette. <http://www.vrealities.com/products/force-feedback-haptics>

Les propriétés immersives, et par conséquent, la génération même de la présence rendent l'utilisation de la RV très avantageuse pour l'étude de la cognition (pour revue, Schultheis & Rizzo, 2001). Cette étude de la cognition peut s'étendre à diverses fonctions mentales, mais peut tout aussi bien ne concerner que les aspects psychologiques de la présence. De plus, la possibilité d'interaction avec le monde virtuel multiplie les possibilités de l'étude de la cognition et l'étend à d'autres domaines du comportement humain tel que la motricité volontaire, ou bien l'interaction entre la cognition et la motricité. La triple interaction cognition, motricité, virtualisation offre à elle seule la possibilité d'un fonctionnement mental peut être unique et spécifique à cette technologie (Sanchez-Vives & Slater, 2005). Enfin, dans le domaine particulier de la psychologie et la neuropsychologie, ces caractéristiques permettent d'étudier aussi bien le fonctionnement cognitif selon une perspective écologique.

## **2. La RV : vers une neuropsychologie de la vie quotidienne**

Nous avons précédemment mentionné une critique souvent faite aux tests neuropsychologiques classiques : ils pourraient ne pas du tout être représentatifs de la manière dont les processus cognitifs fonctionnent dans la vie quotidienne, en dehors du cadre strictement contrôlé du laboratoire, ce qui contribuerait à leur manque de validité écologique.

### *2.1. Créer des conditions réalistes...*

Cinq raisons principales peuvent être citées comme contribuant à ce manque de validité écologique (Schultheis & Rizzo, 2001 ; Hollingworth, 2006):

1) L'environnement réel dans lequel l'être humain évolue est riche en expérience perceptives (e.g., détails visuels relatives au nombre d'objets perçus et de leurs qualité perceptives telles que la forme, la texture, ...).

2) Il est complexe de par la nature des objets perçus ainsi que par l'implication des émotions et des schèmes mentaux qui seront associés à ces objets.

3) Cet environnement réel n'est pas statique comme un test papier-crayon généralement utilisé par n'importe quel neuropsychologue lors d'une évaluation dans un cadre clinique, mais au contraire dynamique. Autrement dit, c'est un environnement essentiellement

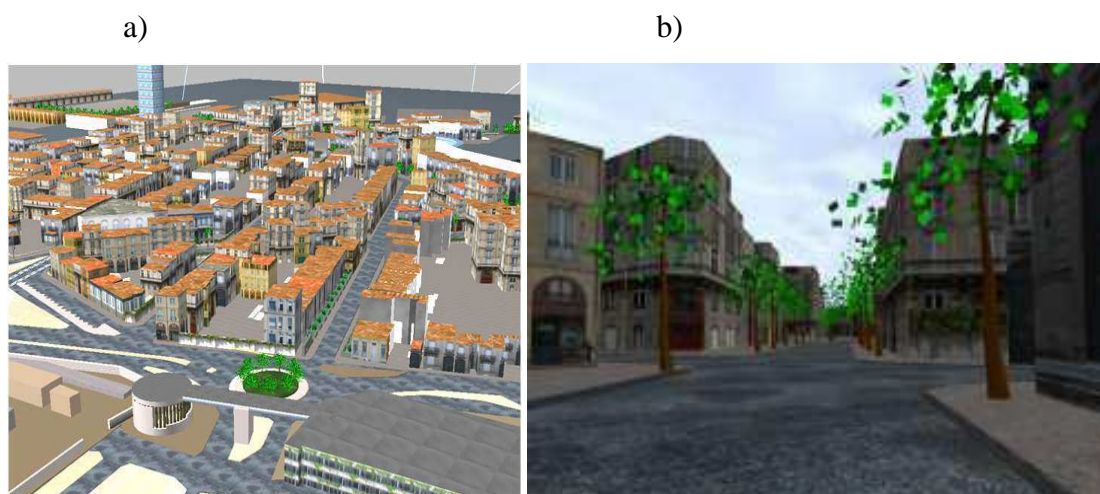
constitué d'autres événements, donc de choses ou des personnes qui agissent sur d'autres objets ou être humains, des objets mouvants, etc. (e.g., un passant traverse la rue, une voiture passe près de lui).

4) L'être humain a une emprise sur ces objets de la vie quotidienne, et il peut faire partie intégrante d'un événement impliquant d'autres êtres humains et objets (e.g., Je suis le sujet qui agit en me déplaçant vers une voiture, mon intention étant d'ouvrir la portière).

5) Cette interaction avec d'autres personnes ou des objets peut s'inscrire dans une activité tout a fait naturelle de la vie quotidienne, ce qui n'est pas le cas d'un test neuropsychologique traditionnel.

Or l'un des problèmes auxquels sont exposés les neuropsychologues est le fait qu'une étude dans un environnement réel ne serait pas du tout concluante car trop de paramètres seraient impossibles à contrôler, sans compter le fait qu'observer les comportements dans un environnement réel peut être dangereux sur le plan de la sécurité du sujet (Rizzo, Schultheis, Kerns, & Mateer, 2004). Parmi les nombreux paramètres qui peuvent être contrôlés au moyen de la RV, les 5 cités ci-dessus constituent les principales. Ces 5 paramètres sont d'ailleurs discutés avec finesse par Rizzo et ses collègues dans leur revue de littérature très complète (Rizzo et al., 2004). La technologie de la RV, de par ses caractéristiques intrinsèques (e.g., texture, couleur, forme, des objets virtuels, la conservation de la distance euclidienne entre un point A et un point B appartenant à un environnement réel entre leurs équivalents virtuels A' et B', ...) permet de créer des EV qui simulent des environnements réels avec un niveau élevé de réalisme. Il est donc possible de simuler 1) des rues, des magasins, des bâtiments, et cela tout en produisant une image en 3D suffisamment proche de la complexité d'un environnement réel : ces divers objets de l'environnement peuvent former des quartiers à grande échelle. Par exemple, notre équipe a pu construire au sein de notre laboratoire un réplica virtuel du quartier St-Augustin environnant l'hôpital Pellegrin respectant les distances réelles (Taillade et al., 2012; Wallet et al., 2011, Figure 19). Le Huge Immersive Virtual Environment HIVE est un autre exemple d'un EV construit à grande échelle dans lequel les paramètres physiques de distances réelles sont conservés, puisque l'utilisateur se meut dans un espace ouvert de 570 m<sup>2</sup> (Waller, Bachmann, Hodson, & Beall, 2007). Ce sont des objets de la vie quotidienne dont la signification est automatiquement extraite par le sujet ; 2) il est possible de créer un EV dynamique par la RV et qui rend compte de la complexité d'un environnement réel. Par exemple, dans le quartier virtuel de Paris utilisé par Plancher et ses collègues, des événements plausibles de la vie urbaine quotidienne étaient simulés comme une collision entre deux voitures (Plancher, Gyselinck, Nicolas, & Piolino, 2010) ; 3) Grâce aux

interfaces sensorimotrices qu'offre la technologie de la RV, il est possible de simuler des mouvements naturels, ou tout simplement d'interagir avec les objets virtuels ou des agents virtuels. L'EV crée par l'équipe anglaise de Burgess permet par exemple aux participants de rencontrer des avatars ou agents virtuels qui leur remettent des objets divers au cours de leur trajet (Burgess, Maguire, & O'Keefe, 2002 ; King, Harlley, Spiers, Maguire, & Burgess, 2005 ; figure 22 voire la section 3.2.2.1) ; et enfin, 4), d'intégrer cette interaction sensorimotrice au sein d'une activité instrumentale simulée. Par exemple, dans le quartier de Paris de Plancher et al. (Plancher, Nicolas, Piolino, 2008 ; Plancher et al., 2010), la moitié des participants devaient explorer l'EV en simulant l'activité de conduite automobile au moyen d'un interacteur moteur en forme d'un volant.



**Figure 19.** a) et b) Version virtuelle du quartier Saint-Augustin autour de l'Hôpital Pellegrin créé au sein du laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux, et utilisé par Wallet et al. (e.g., Wallet et al., 2011).

## *2.2...mais garder le contrôle expérimental*

D'un autre côté, les avancées des sciences informatiques permettent également d'incorporer des caractéristiques de contrôle des paramètres au sein de la technologie de la RV. Ceci permet à la technologie de la RV non seulement de ne pas perdre les propriétés écologiques, tout en permettant une évaluation contrôlée objective et quantitative du comportement humain. Les chercheurs peuvent en effet contrôler des paramètres physiques « virtuels » tels que la vitesse (e.g., effectuer un mouvement de translation vers l'avant sur un plan horizontal grâce à un joystick ou une souris, qui correspond dans l'EV à la vitesse du déplacement de l'avatar dans cette direction spécifique), peuvent répéter un script ou un événement virtuel autant de fois qu'ils veulent, peuvent changer de point de vue lors du déplacement de l'avatar, transposer des paradigmes expérimentaux classiques de la psychologie à une situation plus naturelle où les stimuli sont des objets de la vie quotidienne,

bref des possibilités infinies s'offrent aux chercheurs dans le domaine de la psychologie et neuropsychologie de la cognition quotidienne. Par exemple, la vitesse est un indicateur historiquement important en neuropsychologie cognitive, puisqu'il permet de rendre compte du décours temporel ainsi que de la rapidité des processus cognitifs comme méthode de chronométrie mentale (Donders, 1869). Ainsi transposé à un milieu réaliste, il peut être d'une utilité certaine si l'on veut comprendre la cognition telle qu'elle se manifeste dans la vie quotidienne. On peut très bien envisager le temps de réaction comme un indicateur de vitesse de traitement, de flexibilité mentale ou encore d'attention sélective dans une activité de conduite automobile simulée, à travers le comportement d'accélération et de freinage de la voiture en réponse à des stimuli environnementaux (Fort et al., 2010).

En somme, cette combinaison forte heureuse de la simulation d'EV réaliste intégrant des activités instrumentales et/ou naturelles de la vie quotidienne et du contrôle expérimental certain, permettant de recueillir des indicateurs comportementaux d'une manière objective, répond clairement au besoin de l'étude de la cognition telle qu'elle se manifeste dans le milieu naturel et Cette combinaison à également comme conséquence directe de permettre aux neuropsychologues et aux chercheurs d'avoir une appréciation objective non seulement des comportements globaux tels qu'ils se manifestent à travers les activités complexes de la vie quotidienne mais aussi celle des processus cognitifs discrets qui sous-tendent ces activités (e.g., mémoire, attention, planification, ...). A travers cette réflexion, il est clair que l'utilisation de la RV en neuropsychologie s'inscrit dans l'approche vérisimilaire de la validité écologique.

### *2.3. L'évaluation écologique des processus cognitifs par la RV*

Les principales fonctions cognitives qui ont été l'objet d'un intérêt certain dans le domaine d'application de la RV à la psychologie cognitive, et tout particulièrement à la neuropsychologie, sont l'attention, les fonctions exécutives, les capacités visuo-spatiale, et bien évidemment la mémoire (e.g., voire la revue de Schultheis & Rizzo, 2001). Cependant, pour un propos illustratif nous évoquerons dans la présente section, quelques travaux relatifs à l'évaluation neuropsychologique de l'attention et/ou des fonctions exécutives. Tout de suite après, nous développerons les travaux en lien avec la mémoire.

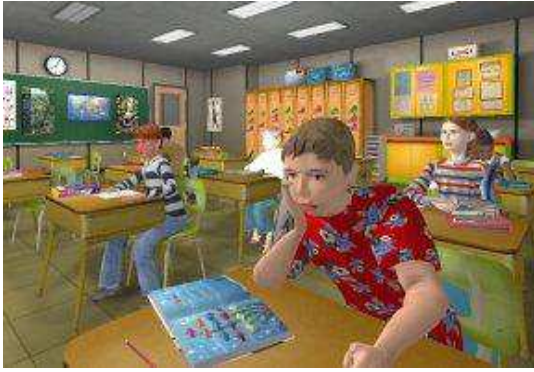
#### ✓ Illustration dans le domaine de l'attention

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, sont distingués : *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), *l'attention soutenue* (vigilance ou capacité à maintenir son attention sur un long intervalle de temps), et *l'attention divisée* (capacité à partager son attention sur au moins deux sources de stimuli) (Lezak et al., 2004). Ces trois aspects de l'attention interagissent mais représenteraient des construits distincts qui trouveraient des corrélats neuroanatomiques également différents (Perry & Hodges, 1999).

L'une des premières applications de la RV pour étudier l'attention dans un cadre neuropsychologique fut l'implémentation de tâches traditionnelles dans des situations simulant la vie quotidienne, telle que la classe virtuelle de Rizzo qui s'inspire du Continuous Performance test (CPT, Rizzo et al., 2000, voir Figure 20). Ce test permet par exemple de détecter des déficits attentionnels chez les enfants souffrant de déficits attentionnels/trouble d'hyperactivité (Parsons, Bowerly, Buckwalter, & Rizzo, 2007). Cette même équipe a récemment publié une autre étude, utilisant cette salle de classe virtuelle, avec un échantillon plus important de sujets (Adams, Finn, Moes, Flannery, & Rizzo, 2009) et rapporte que les enfants présentant un déficit attentionnel/Hyperactivité avaient de moins bonnes performances correctes que les contrôles mais aussi plus d'erreurs d'omissions et de commissions. De plus les qualités psychométriques de ce test en termes de sensibilité aux déficits attentionnels était meilleures que le test traditionnel (87.5 % contre 68.8 %). La sensibilité de ce test aux déficits attentionnels a également été montré indirectement par la mesure de l'effet de la méthylphénidate (psychotrope de la classe des phényléthylamines, phénylacétates et des amphétamines, commercialisé sous le nom de Ritaline® et prescrit principalement contre les troubles attentionnels, Pollak, Shomaly, Rizzo, & Gross-Tsur, 2010). En effet, les enfants ayant pris la Ritaline améliorait significativement leurs performances aussi bien à la classe virtuelle qu'aux CPT traditionnels. Une meilleure sensibilité n'est pas le seul point positif de ce test, les enfants de manière générale ne perçoivent pas ce test comme une situation de mise à l'épreuve, mais plutôt comme une situation plus ludique, ce qui peut éviter des biais dus à la fatigue ou à la perte de motivation (Pollak et al., 2010).



**Figure 20.** La classe virtuelle de Albert Rizzo  
(Rizzo et al., 2000)

Un autre test d'attention a spécifiquement été mis en place afin de détecter ce type de trouble chez les patients présentant une héli-négligence spatiale unilatérale, appelé le Virtual Reality Lateralized Attention Test ou VRLAT (Buxbaum, Dawson, & Linsey, 2012). Ce test a non seulement permis de prédire les performance des patients sur les tests traditionnellement utilisés afin de détecter ces troubles dans cette population particulière de patients mais aussi de détecter des troubles de manière plus sensible chez ceux qui performant dans les normes sur les tests traditionnels. Une variété de travaux existe avec notamment l'étude des mécanismes attentionnels dans des situations telles que la conduite automobile, aussi bien d'un point de vue uniquement cognitif que du point de vue clinique en neuropsychologie (Liu, Miyazaki & Watson, 1999), notamment chez les patients présentant un traumatisme crânien.

✓ Illustration dans le domaine des fonctions exécutives

Les fonctions exécutives 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 et al., 2004). Durant la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, Jacobsen & Nissen (1937) montrèrent le rôle fondamental du cortex préfrontal (CPF) dans le fait de maintenir des informations en mémoire chez le primate, inaugurant la longue série d'études significatives menées par Goldman-Rakic, aboutissant à la connaissance de la structure et de l'organisation du CPF et de son implication dans la mémoire de travail (Goldman-Rakic, 1987, 1995). Il s'agit essentiellement de fonctions dirigées vers un but et fortement ancrées dans l'accomplissement des actions dans notre vie quotidienne (Stuss & Benson, 1986). En plus de la mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité à maintenir des informations en mémoire à court terme pendant un intervalle de temps donné en vue de les manipuler ultérieurement pour répondre à une tâche en présence d'informations fortement distrayantes (Kane & Engle, 2002), la capacité de planification et d'organisation des actions, de résolution de problèmes, mais aussi la capacité d'alterner entre plusieurs tâches ou pensées

(i.e., flexibilité mentale), celle d'inhiber les distracteurs pour ne se focaliser que sur la tâche pertinente (et donc de résister aux interférences) n'en sont que quelques exemples les plus courants. Nous avons mentionné l'attention sélective et l'attention divisée de façon séparée, cependant on pourrait également les inclure parmi les fonctions exécutives, comme le fait Rabbitt (1997). En fait, la capacité d'inhibition est le corollaire de la capacité de sélection des informations pertinentes pour une tâche, tandis que la situation de double tâche implique deux types de capacités : celle de résister à l'interférence due à l'une ou l'autre des tâches si elles sont effectuées simultanément, et celle de changer (« *shift* »), c'est-à-dire d'alterner entre les deux tâches comme stratégie d'optimisation du partage des ressources attentionnelles (Lezak et al., 2004).

En plus des tests classiques issus de la neuropsychologie clinique et de la neurologie comportementale, notamment ceux développés par Alexandre Luria, comme le test de « poing, tranche, paume » (Luria, 1966/1980), il existe de nombreux tests traditionnels issus de la neuropsychologie cognitive 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 (e.g., tour de Hanoi) 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, mesurant autant la flexibilité que les capacités d'organisation et de résolution de problème (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 ; Spooner & Pachana, 2006). Ainsi, étant donné le lien direct entre les activités de vie quotidiennes et les fonctions exécutives, l'intérêt de l'approche écologique des fonctions exécutives est d'une importance capitale pour la psychologie et la neuropsychologie cognitive ainsi que la pratique clinique (Willis et al., 1998).

La RV a aussi été mise à contribution afin d'évaluer ces fonctions exécutives. Nous pouvons mentionner les études ayant simulé par exemple des tâches effectuées lors d'un shopping dans un supermarché virtuel (Josman, Scheniderman, Klinger, & Sheveil, 2009 ; LoPriore Castenuovo, Liccione & Liccione, 2003) ou bien celles simulant la préparation d'un repas (Cao, Douguet, Fuchs, & Klinger, 2010 ; Kirshner, Weiss, & Tirosh, 2011). Du côté des supermarchés, par exemple, Lee et al. (2003) ont implémenté un supermarché virtuel, dans lequel les patients hémiplésiques devaient se promener. Etaient notamment relevés des paramètres tels que le temps total mis pour effectuer le parcours, la distance parcourue, le nombre de collisions avec les murs, et le nombre d'erreurs. Dans la même veine, LoPriore et

al., (2003) ont créé le V-STORE, un autre supermarché dans lequel les sujets devaient effectuer des tâches, mieux définies que dans l'étude précédente, et ordonnées selon le niveau de complexité : planifier, catégoriser, retenir les informations en mémoire de travail et effectuer des tâches demandant de l'attention. Au moyen du supermarché Virtual Action Planning Supermarket VAP-S qui est spécifiquement mis en place pour évaluer la capacité de planification, l'étude de Josman et al. (2009) comparait 30 patients présentant une schizophrénie avec 30 contrôles. Dans ce supermarché (voir Figure 21), les sujets doivent parcourir les rayons, comportant des articles usuels tels que boissons, aliments, etc., avec des caissiers et des clients virtuels. Les sujets naviguent dans l'EV en utilisant les touches fléchées du clavier de l'ordinateur, et les mesures comportementales telles que le temps de navigation, la distance parcourue, le nombre d'items (produits) correctement achetés (sélectionnés), le nombre d'erreurs dans la sélection de ces produits et dans l'achat (e.g., sélectionner le mauvais produit ou partir sans payer), le nombre de pauses, etc. En plus de ce test virtuel, des tests traditionnels des fonctions exécutives étaient administrés tels que le Zoo Map Test ou encore le test des six éléments (le premier étant un test de planification du parcours basé sur la promenade dans un zoo, qui est en fait un labyrinthe papier-crayon, faisant partie du BADS, et le second évaluant les capacités de résolution de problèmes d'arithmétique, de copie de dessin et de dénomination de photos, suivant des contraintes précises). Cette étude a montré des performances meilleures dans la plupart des indices relevés chez les contrôles par rapport aux patients schizophrènes, permettant de constater des déficits de nature exécutive, et plus précisément impliquant la planification chez ces derniers.



**Figure 21.** Supermarché VAP-S utilisé pour évaluer la planification dans des troubles tels que le MCI (Werner et al., 2009) ou la schizophrénie (Josman et al., 2009). La tâche est de saisir 7 items et de les payer à la caisse. La distance parcourue et le temps sont des mesures comportementales que le système permet de relever.

Du côté de la cuisine, et des tâches de préparation de repas, Zhang et al. (2001) ont montré en évaluant lors de diverses sous-étapes de la préparation du repas des processus tels

que le traitement global de l'information, le séquençage logique des étapes, la résolution de problème et la vitesse de traitement, que sur chacune de ces composantes les patients traumatisés crâniens avaient des performances bien moindres que les contrôles. Une autre étude, utilisant le Meal-Maker (Kirshner et al., 2011), a montré chez des enfants souffrant de « paralysie cérébrale », qui est un trouble du développement moteur, pouvant être accompagné de troubles cognitifs et de retard mental, que ceux-ci mettaient significativement plus de temps à préparer le repas comparés aux enfants contrôles (à développement neurotypique), font plus d'erreurs lors de cette préparation, notamment dans l'ordre logique de la préparation, mais aussi dans la sélection des mauvais ingrédients ou bien omettant les plus importants.

L'ensemble de ces études sur les fonctions exécutives et l'attention montrent donc qu'une implémentation des tâches dans une activité quotidienne plus globale est non seulement une manière plus écologique d'évaluer les fonctions cognitives, mais elle permet également de détecter des différences pathologiques entre les groupes, démontrant ainsi une sensibilité aux processus évalués, parfois même meilleure que les tests traditionnels.

### **3. Etude de la mémoire par la RV**

Dans cette partie, les modèles de la mémoire spatiale dans le cadre d'une activité de navigation, ainsi que la place de la mémoire spatiale dans les modèles de la mémoire sont présentés en préalable de notre état de l'art relatif aux études en RV afin de mieux en comprendre les enjeux scientifiques. Puis, l'effet de la navigation active sur les performances de mémoire sera examiné à la lumière des études utilisant la RV.

#### *3.1. La mémoire spatiale dans le contexte de l'activité de navigation*

La navigation spatiale est une activité utile par exemple lorsqu'il s'agit de trouver son chemin, ou *wayfinding* (Hegarty & Waller, 2005), faisant de celle-ci une activité (de la vie quotidienne) complexe, fortement saturée en processus mnésiques, et l'une des plus étudiée dans le domaine de la mémoire spatiale. Deux modèles dominent le champ de la mémoire spatiale, la premier étant le modèle L-R-S (*Landmark-Route-Survey*) de Siegel & White (1975), et le second le modèle des cadres de références spatiales ou *spatial frame of reference* (O'Keefe & Nadel, 1978).

✓ Modèle hiérarchique de Siegel & White (1975)

Dans le modèle de Siegel & White (1975), les *landmarks* sont considérés comme des objets fixes dans un environnement, et qui peuvent être saillants afin de faciliter la navigation spatiale, le *route* est défini comme étant des séquences de localisations fixes, marquant le trajet d'un individu, et enfin le *survey* serait une représentation mentale unique formée à partir des deux formes de connaissances spatiales citées précédemment et impliquant l'estimation des distances entre les *landmarks* (Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Chacune de ces formes de connaissance s'acquiert de manière hiérarchique par niveau d'abstraction, le *survey knowledge* étant la connaissance spatiale la plus abstraite sur cette échelle.

✓ Modèle à deux systèmes

Le second cadre théorique dominant propose que l'encodage de l'orientation et de la localisation d'un objet dans l'espace ne puisse se faire sans le recours d'un système de coordonnées, ou référentiels. Ces systèmes de coordonnées sont de deux types, l'un étant le référentiel égocentrique, et l'autre le référentiel allocentrique (O'Keefe & Nadel, 1978). Le référentiel égocentrique prend comme centre de référence le corps de l'organisme vivant (l'être humain en l'occurrence), à partir duquel les informations spatiales peuvent être encodées et récupérées en mémoire. Par conséquent, les informations spatiales sont encodées et organisées selon la perspective du sujet, c'est-à-dire dépendent de l'orientation du sujet dans l'espace selon les axes droite-gauche et devant-derrière du corps (Diwadkar & McNamara, 1997). Grâce à ce référentiel je peux encoder la localisation d'un objet particulier par rapport à ma propre position dans l'espace, me permettant de savoir que la tasse de thé se trouve sur la table à ma droite, et que je fais face à la fenêtre. Par conséquent, la représentation égocentrique me permet d'atteindre cette tasse. Une tâche typiquement égocentrique est celle qui consiste à pointer en direction d'une cible mémorisée mais absente durant le test. Grâce à la coordination entre la perception et l'action, je peux également éviter la crotte de chien sur le trottoir lorsque je suis en train de marcher. Pour le référentiel allocentrique, la position des objets dans l'espace est définie indépendamment de la position du corps de l'organisme, il s'agit en fait d'un référentiel beaucoup plus proche du référentiel terrestre ou géocentrique (Diwadkar & McNamara, 1997). Grâce à ce référentiel, quelle que soit mon orientation, je sais que le jardin de Tuileries se trouve à l'ouest de la Bastille et que le couvent des Cordeliers se trouve dans le prolongement du Boulevard St-Germain en allant vers l'est de Paris, dans la direction du jardin des plantes abritant la galerie de paléontologie et d'anatomie comparée. En ayant le plan du quartier latin, je peux décider de planifier mon

parcours depuis le jardin des plantes jusqu'au couvent, ce qui implique également qu'une connaissance plus étendue me permet aussi de prendre des raccourcis. Enfin, cette représentation allocentrique me permet également de reconnaître des *landmarks* ou des objets dans un tel environnement familier (e.g., la statue de Danton, le café Procope,...) et d'encoder la localisation des objets dans l'espace les uns par rapport aux autres. Selon l'hypothèse des deux voies (*the two-stream hypothesis*, Milner & Goodale, 1995), la représentation égocentrique serait sous le contrôle de la voie dorsale (ou le système du « où »), reliant le cortex visuel primaire V1 (ou BA 17) au cortex pariétal postérieur (CPP, et plus spécifiquement la partie médiane du cortex pariétal postérieure, nommé BA 7b, encore connue sous le nom de précunéus), ainsi que du réseau pariéto-frontal, subdivisé en pariéto-préfrontal pour la mémoire de travail spatiale (e.g., mise à jour spatiale), et en pariéto-prémoteur impliqué dans la boucle perception-action (i.e., atteindre ma tasse de thé) (Kravitz, Saleem, Baker, & Mishkin, 2011). En revanche, la représentation allocentrique serait sous le contrôle de la voie ventrale (ou la voie du « quoi »), reliant V1 au cortex inféro-temporal (dont le gyrus fusiforme), mais impliquerait également le cortex pariétal, le précunéus, le cortex retrosplénial (BA 29 et 30, localisés au sein du corps calleux et dans la partie postérieure du cortex cingulaire), ainsi que le CPH et le HC (Thaler & Goodale, 2011). L'encodage égocentrique précéderait l'encodage allocentrique, et par voie de conséquence, une représentation de type allocentrique ne peut émerger que d'une représentation égocentrique, caractérisant de ce fait un processus sériel d'abstraction des représentation, toutefois un processus parallèle est également envisageable (Feigenbaum & Morris, 2004).

Remarquons au passage que ce modèle ne serait pas incompatible avec le premier dans la mesure où la *route knowledge* est une acquisition de la connaissance de la route dépendante entièrement du point de vue du sujet, tandis que le *survey knowledge* est une acquisition de la connaissance spatiale sous forme de carte cognitive selon une perspective *à vol d'oiseau*, également correspondant à la distinction dorsale/ventrale, cependant certaines des caractéristiques neuronales de la *route knowledge* semblent également commune avec celles de la *survey knowledge* telles que l'activation du LTM, et plus exactement de la formation hippocampique (Aguire & D'Esposito, 1997). L'une des possibilités qui a été mise en avant pour expliquer cette activation commune de la formation hippocampique pour les deux types de processus est le fait qu'elles semblent toutes les deux impliquées dans la formation de la mémoire épisodique (Wolbers & Büchel, 2005).

### 3.2. Place de la mémoire spatiale dans les modèles de mémoire : Approches unifiées

La mémoire spatiale n'est en rien différente de la mémoire épisodique, sinon que seul un aspect particulier de celle-ci est pris en compte, à savoir la nature spatiale de ses opérations d'encodage, de stockage, et de récupération (Tulving, 2002 ; Einchenbaum, 2004). Cette relation d'inclusion est légitimée au niveau structurel : en effet, l'HC est la structure cérébrale dont le rôle important a été mis en évidence à la fois pour la mémoire épisodique (voire chap. I) et la mémoire spatiale (O'Keefe & Nadel, 1978), aussi, le cortex pariétal, dont le rôle dans le traitement de l'information visuo-spatiale est connu, est systématiquement activé lors de tâches impliquant l'encodage ou la récupération d'événements (voir, Cabeza, 2008, pour une revue).

Un exemple intéressant à l'égard de cette relation est le fait qu'à l'encontre du point de vue de Milner & Goodale (1995), certaines actions consistant à pointer et saisir un objet ont été identifiées comme impliquant une forme de conscience que nous avons déjà abordée dans le précédent chapitre, la conscience auto-noétique, dont la base neurale serait le CPF. Des recherches récentes montrent aussi l'activation du cortex pariétal médian (BA 7) ; ces deux régions formeraient d'ailleurs un axe ou un réseau impliqué dans cette conscience auto-noétique, ou plus basiquement dans une *self-consciousness* (que l'on traduirait par *conscience de soi ou égocentrique*, limitée à l'espace péri-personnel, c'est-à-dire l'espace qui entoure le corps humain et défini par un cercle de rayon inférieur ou égale à 30 cm au delà de la longueur du bras, voir, Gallese, 2007 pour revue ; Vaishnavi, Calhoun, & Chatterjee, 2001). Or, rappelons que le cortex pariétal médian est spécifiquement relié à la représentation égocentrique. De plus, l'activation du cortex pariétal (en plus du CPF) est associée au processus de recollection dans divers études et ce, de manière systématique, sans pour cela que le rôle du cortex pariétal dans la mémoire épisodique soit clairement défini (e.g., Wagner, Shannon, Kahn, & Buckner, 2005).

De nombreux modèles ont été proposés pour expliquer le lien de la mémoire épisodique avec le cortex pariétal, dont le modèle attentionnel de Corbetta & Shulman (2002), ou bien le récent modèle *Attention to Memory* (AtoM) de Ciaramelli, Cabeza et collègues (Ciaramelli, Grady, & Moscovitch, 2008 ; Cabeza, Ciaramelli, Olson, & Moscovitch, 2008) qui respectent tous les deux la dissociation dorsale/ventrale au sein même du cortex pariétal pour les comportements spatiaux guidés ou dirigés vers un but (e.g., planifier la préhension d'un verre, puis effectivement saisir le verre).



De manière très générale, le modèle AtoM se réfère à la fonction attentionnelle du cortex pariétal postérieur, dans laquelle les régions dorsales du cortex pariétal postérieur seraient le siège de traitements descendants (ou top-down) de l'attention, tandis que les régions ventrales seraient associées aux traitements ascendants (ou bottom-up). Ainsi, le système attentionnel dorsal serait dévoué à la planification et la sélection des réponses tandis que le système attentionnel ventral serait utile pour « la détection des stimuli pertinents du point de vue comportemental, particulièrement s'ils sont saillants et inattendus » (Corbetta Shulman, 2002). Cette idée a été élargie à la mémoire épisodique par Cabeza et ses collègues de la façon suivante : le système attentionnel ascendant détectera les *landmarks* ou tout autre type d'indices externe ou interne présent dans l'environnement ou dans la conscience, qui généreront un rappel spontané des souvenirs épisodiques (e.g., l'euphorie synergétique, voir chapitre I), en revanche le système attentionnel descendant guide la récupération intentionnelle, en d'autres termes son rôle est de maintenir en mémoire de travail la nature de l'information recherchée pendant que le sujet est en train de chercher l'information (*online*) c'est-à-dire durant la récupération mais aussi post-récupération où le sujet doit monitorer si le souvenir récupéré est le bon (*off-line*). Ce modèle prédit par conséquent que les patients présentant une lésion pariétale postérieure dorsale seraient incapables de récupérer les informations qui nécessitent une recollection demandant de l'effort. À l'inverse les patients présentant une lésion pariétale postéro-ventrale seront incapables d'une récupération spontanée car les stimuli internes ou externes ne capteront par leur attention spontanément, déficit que Cabeza et collègues nomment hypothétiquement « négligence mnésique » par analogie à la négligence spatiale unilatérale, mais une quelques observations sur les performances de rappel des patients présentant une négligence spatiale unilatérale tend à confirmer cette proposition (e.g., Meador, Loring, Bowers, & Heilman, 1987 ; Berrhyll, Phuong, Picasso, Cabeza, & Olson, 2007).

Alors que ce modèle est limité à l'apport du cortex pariétal à la mémoire épisodique, des modèles plus globaux ayant pour ambition d'unifier la mémoire spatiale et la mémoire épisodique ont été proposés, nous en dénombrons trois à notre connaissance, dont deux computationnels<sup>2</sup> et un neuropsychologique basé quant à lui sur la commune mobilisation de

---

<sup>2</sup> D'abord, le modèle de contexte temporel, *Temporal Context Memory* en anglais se propose d'être une théorie unificatrice de la mémoire épisodique, spatiale et relationnelle (Howard, Fotedar, Datey, & Hasselmo, 2005), où le fonctionnement du lobe temporo-médian occupe une place prépondérante. L'autre modèle est proposé par Rolls, Stringer & Trappenberg (2002), dans lequel un réseau de neurones artificiels est défini comme étant un attracteur, simplement en implémentant une règle d'apprentissage Hebbienne par association. Étant donné que du point de vue computationnel, la mémoire épisodique comme la mémoire spatiale sont considérées comme un réseau autoassociatif stockant des événements discrets (e.g., des objets) pour l'un, et des événements continus

la formation hippocampique entre la mémoire spatiale (surtout sur son versant allocentrique) et la mémoire épisodique.

Le modèle neuropsychologique nous vient des travaux de Burgess, O'Keefe et collègues, qui synthétisent de manière originale les travaux effectués dans la navigation spatiale chez le rat avec la définition de la mémoire épisodique en l'adaptant à l'être humain (Burgess, O'Keefe, 2002 ; King, Hartley, Spiers, Maguire, & O'Keefe, 2005). Comme le suggèrent O'Keefe & Nadel (1978), il se pourrait que la mémoire et la navigation, qui ne sont limitées qu'au traitement et à la récupération des informations spatiales chez les rats aient évolué en un traitement et à la récupération d'informations plus générales chez l'être humain, correspondant à la mémoire déclarative. Ainsi, les cellules directionnelles de la tête (*head direction cells*, Taube, Müller, & Ranck, 1990), qui déchargent lorsque le rat oriente sa tête dans une direction donnée indépendamment de sa localisation dans l'espace, ont pourtant une activité fortement influencée par les indices visuels se trouvant dans cet environnement tels que les *landmarks*. Avec ces cellules directionnelles, les cellules de lieu (*place cells*, O'Keefe & Dostrovsky, 1971), qui déchargent lorsqu'un organisme se trouve à une localisation spatiale spécifique, sont connus pour être impliquées dans la formation de la carte cognitive. Cependant il a aussi été montré que ces cellules du lieu déchargent lorsque des changements ont lieu dans des caractéristiques non-spatiales du contexte telles que la couleur ou l'odeur (e.g., Hayman & Jeffery, 2008), impliquant leur rôle dans un encodage contextuel plus large que le seul contexte spatial (pour plus de détails sur la similarité au niveau neurophysiologique entre les processus caractéristiques de la mémoire épisodique et du codage spatial, voir, Buzsaki & Moser, 2013).

De manière très générale, il a donc été possible d'assimiler les représentations spatiales de nature égocentrique, et plus particulièrement allocentrique, à une représentation de nature épisodique (Eichenbaum, 2000). Ce point de vue semble aussi trouver appui dans les études neuropsychologiques récentes faites au moyen de la RV par l'équipe de Burgess, que nous détaillons dans la section suivante.

---

pour l'autre (e.g., le trajet, la relation entre les objets, etc), il est possible de les unifier au sein d'un même attracteur, expliquant par exemple pourquoi un *landmark* peut être intégré au sein de la représentation de la route, et à l'inverse pourquoi un lieu particulier ou même un trajet peut correspondre à un indice de récupération d'un objet.

### 3.3. Etude de la mémoire épisodique par la RV : mémoire des objets et mémoire spatiale

Le développement de la technologie de la RV a représenté une réelle opportunité pour les chercheurs dans les domaines des neurosciences cognitives et de la neuropsychologie de la mémoire, leur permettant de reproduire des tests traditionnels de manière plus écologique. Dans un EV à grande échelle, nous évoluons de manière plus ou moins naturelle parmi des routes et des objets en 3D, à l'instar de l'environnement réel. La remémoration peut se manifester sous diverses formes, par exemple en tant que tâche d'estimation de distance ou d'angle, ou bien de jugement, de reproduction brute par dessin, etc. Et tout comme dans une procédure visant à évaluer la mémoire épisodique, une tâche de reconnaissance peut également être proposée. A l'aide de ce type de tâches, depuis ces dernières années, les études utilisant la RV s'intéressent à la distinction entre mémoire d'objets (ou landmarks) et mémoire spatiale (allocentrée) (Nadel, Samsonovich, & Moscovitch, 2000).

Concernant le rôle des *landmarks*, (Tlauka & Wilson, 1994 ; Jacobs, Thomas, Laurance, & Nadel (1998), il est montré par exemple dans une reconstruction virtuelle d'une arène que la mémoire de la localisation d'un objet reste intacte lorsque l'objet a été enlevé de sa position initiale, en revanche elle est perturbée si l'objet a changé radicalement de position. De manière plus étendue, plus globale, les landmarks correspondent au « quoi », c'est-à-dire aux objets, mais la mémoire épisodique ne se réduit pas à la mémoire des objets ; avec les aspects spatiaux et temporels, la mémoire épisodique forme un contexte plus globale qui peut constituer un épisode bien spécifique. La RV permet de tester ces trois aspects contextuels de la mémoire épisodique en les intégrant au sein d'une unique situation à laquelle le sujet est exposé durant sa navigation dans l'environnement virtuel. Ainsi, utilisant une tâche de navigation par la RV, Janzen & van Tourenout (2004) ont testé des participants sains sur leur mémoire de la reconnaissance des landmarks disposés soit à des endroits spécifiques tels que les carrefour ou des tournants, appelés points décisionnels, ou à des endroits non-spécifiques (e.g., le long d'un couloir). Ces auteurs ont remarqué que la mémoire de ces objets dépendait fortement de leur localisation. En effet, les landmarks disposés au niveau des points décisionnels étaient mieux reconnus que ceux disposés dans des endroits non-spécifiques. Cette étude, ainsi que celle de Ekstrom & Bookheimer (2007), dans laquelle les participants devaient mimer un chauffeur de taxi et chercher de passagers potentiels dans un environnement virtuel pour les déposer devant des boutiques (environnement appelé « yellow cab ») qui constituaient des landmarks spécifiques, ont montré que la mémoire de reconnaissance de ces landmarks activait fortement le CPH. En utilisant un environnement

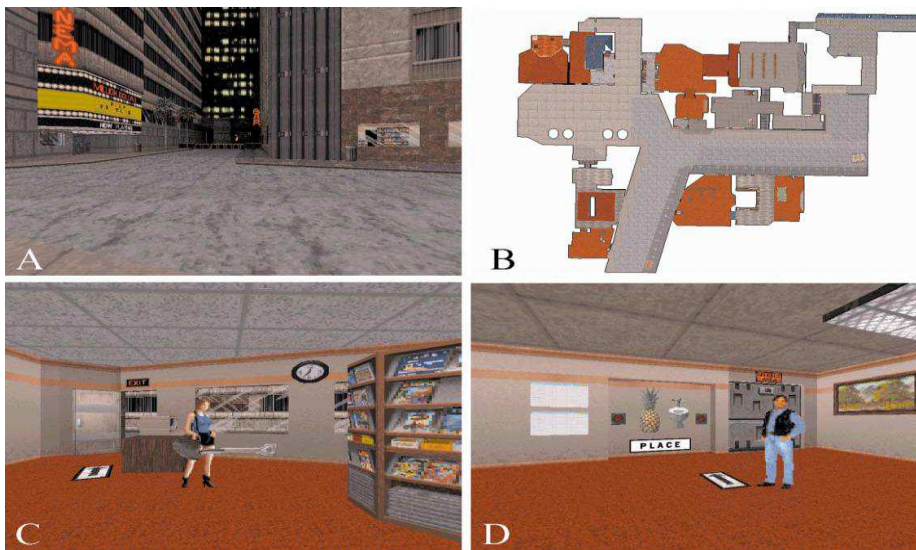
différent mais basé sur le même principe, Burgess et ses collègues (e.g., Burgess et al., 2001) ont demandé à leurs participants de naviguer activement (voire la section suivante pour l'effet de la navigation active) dans une ville virtuelle à grande échelle (voire Figure 22) et prendre un objet donné par une personne qu'ils rencontraient dans un lieu spécifique lors de leur parcours mais leur dispositif n'était pas immersif. Les sujets étaient soumis à une tâche de reconnaissance à choix forcée pour laquelle leur mémoire des objets, celle du lieu dans lequel l'objet a été remis ainsi que celle de l'ordre temporel de la remise des objets étaient testées. Dans cette même procédure, la mémoire spatiale allocentrique était testée en demandant aux participants d'atteindre des lieux qu'ils avaient précédemment rencontrés lors de leur navigation, en parcourant de nouveau les rues de la ville. Les participants reconnaissaient la plupart des composantes évaluées avec un score pratiquement avoisinant un effet plafond. Les données de neuroimagerie permirent d'identifier un ensemble de réseaux comprenant le cortex parahippocampique, le cortex pariétal postérieur impliqués dans la mémoire spatiale ; en plus de celles-ci, d'autres régions comme l'hippocampe, le cortex pariétal droit, le précunéus participaient à la récupération des objets, mais aussi des personnes et des localisations des objets.

Dans une autre étude menée en utilisant la même procédure et le même matériel, les auteurs testaient un jeune homme de 22 ans (Jon) souffrant d'une lésion focale bilatérale n'atteignant que l'HC et épargnant le CPH (Vargha-Khadem et al., 1997), pourtant il n'a réussi ni le test de mémoire spatiale allocentrique, ni la tâche de reconnaissance de la localisation spatiale. En revanche, ses performances sur la tâche de reconnaissance des objets étaient préservées. Dans deux études suivantes, (Spiers et al., 2001 ; King et al., 2002), les performances de ce patient furent comparées à un groupe de patients ne souffrant que d'une lésion du lobe temporal médian droit (TL droit) et un autre groupe ne présentant une lésion qu'au niveau du lobe temporal gauche (TL gauche). Comparés aux contrôles, les auteurs ont noté une performance équivalente en termes de déficit chez Jon et les patients TL droit sur la tâche de mémoire spatiale allocentrique, mais également une performance équivalente entre Jon et les TL gauche sur les tâches de mémoire épisodique (« quand », « qui », « quoi »). Il est intéressant de noter que les patients TL droit présentaient non seulement une lésion de l'HC mais également du CPH, et comparés à Jon qui présentait pourtant une lésion hippocampique bilatérale sans atteinte du CPH, leur performance à la tâche de reconnaissance des objets était altérée.

Ces études mettent donc en évidence deux choses : a) l'utilité de la RV pour l'étude d'une fonction mnésique complexe telle que la mémoire épisodique, dans une situation

contrôlée mais néanmoins proche de la réalité, d'autant plus que les résultats sont validés du point de vue neuropsychologique, et b) de telles études appuient et étendent les connaissances que nous avons dans les neurosciences cognitives de la mémoire : ces études permettent de mieux délimiter le rôle de l'HC et des structures adjacentes dans la mémoire spatiale et épisodique avec une dichotomie gauche/droite.

Ainsi, le LTM gauche serait plus dévoué aux aspects contextuels de l'épisode, tandis que le LTM droit serait plus spécialisé dans la mémoire spatiale allocentrique. De même le CPH droit serait plus impliqué dans la mémoire des objets.



**Figure 22.** La ville virtuelle utilisé dans plusieurs études du même groupe de recherche (Burgess, 2002 ; King et al.,2005). A) une vue égocentrique de la navigation dans la ville, centrée sur le sujet; de nombreux lieux entourent les rues, notamment un cinéma, une librairie, un bar, une station de métro. B) vue à vol d'oiseau de la ville virtuelle sous forme de plan. C) Une d'un événement épisodique, dans lequel un avatar ou une personne virtuelle donne un objet au participant dans un lieu donné. D) Une vue de la phase de test dans lequel le lieu est montré, mais la tâche du participant est de dire quel objet lui a été remis à cet endroit précis. Adapté de Burgess, Maguire, & O'Keefe (2002), avec la permission des auteurs.

### 3.4. L'effet de la navigation active

En utilisant la RV il est possible de reproduire des conditions pratiquement naturelles dans laquelle la mémoire et l'action sont intimement liées. Dans une expérience typique on compare la navigation active dans laquelle les participants utilisent les interfaces sensori-motrices (e.g., le clavier, la souris, le joystick, le dispositif HMD...) afin de se mouvoir librement dans l'environnement virtuel et une condition où les participants sont simple observateur.

#### ✓ Contrôle moteur vs. Contrôle cognitif de la navigation active

La navigation active n'impliquerait pas seulement un *contrôle moteur* permettant de saisir un objet, de pointer vers un objet, de se diriger vers un objet (que ce soit pas une

locomotion réelle ou virtuelle), ainsi que d'avoir en retour (feedback) des informations proprioceptives et vestibulaires relatives aux mouvements du corps dans l'espace égocentré (Berthoz, 1999), mais également un *contrôle cognitif* sous forme d'une intention préalable pour exécuter les mouvements, prendre des décisions en temps réel pendant leur exécution quant à la direction spatiale souhaitée, aux objets visés parmi ceux qui sont disponibles dans notre champ visuel ou bien aux *landmarks* visés parmi ceux qui ne sont pas directement visibles dans un environnement à grande échelle (Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997). Cette dichotomie moteur/cognitif ne commence à être étudiée que depuis peu. Car la question qui s'en suit naturellement est la suivante : quelle est la part du moteur et du cognitif dans la navigation active ?

La toute première étude examinant la navigation active sur les performances en mémoire spatiale fut celle de Péruch, Vercher & Gauthier (1995). Les participants dans la condition active avaient aussi bien un contrôle moteur (à l'aide d'un joystick) qu'un contrôle cognitif sur leur exploration de l'environnement virtuel tandis que dans la condition passive les participants ne faisaient qu'observer la présentation pré-enregistrée de la navigation de l'environnement. Cependant, ce furent les mêmes participants qui étaient soumis aux deux conditions (mesure répétée). La condition active donna de meilleures performances de navigation en virtuel comparé à la condition passive. Dans une étude majeure qui visa pour la première fois à déterminer quels composants de la navigation active joueraient un rôle plus important dans un éventuel bénéfice apporté quant à la mémoire, Wilson et al. (1997, expérience 1) constituèrent quatre groupes : le premier groupe, considéré comme « actif-avec mouvement » possédait aussi bien le contrôle moteur que le contrôle cognitif pour explorer l'environnement, le groupe « actif-sans mouvement » n'avait que le contrôle cognitif quand à la navigation, mais pas le contrôle moteur. De la même manière, le groupe « passif » était subdivisé en « avec mouvement » et « sans mouvement », le premier ne possédant que le contrôle moteur, et le dernier n'ayant aucun des deux types de contrôle sur la navigation. La passation n'était pas individuelle, l'un des membres des groupes actifs était toujours apparié à l'un des membres du groupe passif selon une procédure nommée « *yoked control* », de façon à permettre à l'un et à l'autre de naviguer dans l'environnement en temps réel. Cette procédure permet surtout d'éviter que les différences dans les performances entre les actifs et les passifs ne soient dues à une exposition à des stimuli différents entre les deux groupes ainsi qu'au temps passé à les explorer. Ainsi, lorsque l'un des actifs « avec mouvement » dirigeait la navigation, le passif « sans mouvement » observait en temps réel ce trajet. De même, lorsque l'actif « sans mouvement » dirigeait la navigation, il était apparié à un passif « avec

mouvement » qui suivait les instructions en appuyant sur les touches du clavier pour naviguer. Ces groupes expérimentaux étaient comparés à un groupe contrôle qui se soumettait au test d'orientation spatiale sans avoir été soumis au préalable à l'exploration de l'environnement virtuel. En effet, la phase test consistait, à partir de l'un des landmarks, à pointer vers les deux autres (test de navigation égocentrique), et à dessiner un plan de l'environnement contenant les landmarks. Comparés aux contrôles, tous les groupes expérimentaux montrèrent de meilleures performances, puisqu'ils étaient exposés à l'environnement. Cependant, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les actifs et les passifs. Dans leur seconde expérience (Wilson et al., 1997, expérience 2), ils tentèrent alors de répliquer les conditions de l'étude de Péruch et al. (1995). En effet, deux différences majeures séparaient ces études : Péruch et al. utilisaient un joystick et de plus, ce n'était pas l'orientation en soi qui était mesurée mais la navigation (wayfinding), qui est une activité spatiale bien plus complexe. Cette fois-ci les participants exploraient le même environnement et devaient étudier la position de quatre objets (des cubes) de couleurs différentes, qu'ils devaient retrouver lors de la phase test. Les deux groupes apprenaient au fur et à mesure des essais à localiser les cubes plus rapidement, et en faisant de moins en moins d'erreurs sans qu'il y ait une supériorité d'un groupe par rapport à l'autre contrairement aux résultats de Péruch et al. Dans ces expériences, apparemment aucun des deux types de contrôles n'avaient un avantage comparés à une condition passive. En 2002, Wilson & Péruch tentèrent de nouveau l'expérience toujours en utilisant la procédure d'appariement « *yoked control* », et cette fois-ci, trouvèrent qu'au contraire les sujets passifs avaient une meilleure mémoire de la localisation des objets que les actifs (i.e., tâche de pointage) comparé aux passifs qui étaient testés individuellement. Par la suite, de nombreuses études dans le domaine de la navigation et de la mémoire spatiales donnèrent des résultats contradictoires, certaines montrant une augmentation de la performance de mémoire spatiale (en générale) après une navigation active (Farrell, Arnold, Petiffer, Adams, Graham, & MacManamon, 2003 ; Péruch & Wilson, 2004) et d'autres ne montrant aucune différence entre les deux formes de navigation (Gaunet, Vidal, Kemeny, & Berthoz, 2001 ; Wilson, 1999).

✓ Hypothèses explicatives des inconsistances

De nombreuses raisons ont été avancées afin de rendre compte des inconsistances de la littérature sur l'effet de navigation active, dont (Chrastil et Warren, 2012, pour revue) :

i) *Les caractéristiques de l'environnement virtuel* : le niveau de complexité de l'environnement virtuel (e.g., le nombre d'intersections ou de tournants, Wallet et al., 2008, 2009) et le niveau de réalisme (Wallet, Sauzéon, Arvind Pala, Larrue, Zheng, & N'Kaoua, 2011) sont des facteurs intrinsèques   l'environnement virtuel qui touchent la charge cognitive induite par l'EV et conditionnent l'effet positif de la navigation.

ii) *Le rôle de la composante motrice via les stimulations vestibulaires et proprioceptives* : l'une des raisons évoquées est le manque d'informations proprioceptives et vestibulaires suffisantes lorsqu'on utilise un joystick ou un clavier afin de pointer vers des objets ou de se diriger vers des objets, comparé   une situation réelle dans laquelle on doit saisir des objets ou réellement utiliser la locomotion, une hypothèse qui semble trouver un certain support dans des études récentes. Par exemple, Ruddle & Lessel (2009) trouvèrent que les participants qui utilisaient leur locomotion pour naviguer dans un environnement virtuel   petite échelle (i.e., taille d'une chambre) avaient de meilleures performances en termes de localisation des objets dans l'espace lors de la phase test de wayfinding comparés   ceux qui n'utilisaient que le joystick. Cette expérience fut répliquée par la suite par Ruddle et son équipe (Ruddle, Volkova, & B lthoff, 2011). Ces résultats sont également confirmées au sein de notre laboratoire par les travaux de Florian Larrue (Larrue et al., 2013). Dans une récente étude, la préférence irait vers un rôle déterminant dans l'information proprioceptive plutôt que vestibulaire (Chrastil & Warren, 2013), où il a été montré, encore une fois   l'instar de Ruddle et al. (2009, 2011) et de Larrue et al. (2013) que la locomotion (apportant une information podokin tique) serait le facteur déterminant de la navigation active au détriment des informations visuelles, vestibulaires, et même purement cognitifs (décisionnels) dans la performance de navigation (wayfinding). De plus, le bénéfice de la navigation active sur le wayfinding serait visible surtout lorsque des dispositifs immersifs sont utilisés (e.g., Waller, Loomis & Haun, 2004).

iii) *Le rôle de la composante cognitive* : Les autres hypothèses concernent les processus cognitifs mis en jeu lors de l'encodage de l'environnement. Parmi ces processus, le rôle du fonctionnement exécutif et celui de la mémoire ont été mis en avant.

Parmi les *fonctions exécutives* influençant la navigation active, deux ont été retenue par les chercheurs : l'attention et la prise de décision.

La façon dont l'attention est allouée peut déterminer les aspects de l'environnement mieux encodés lors de la navigation, appelée *hypothèse attentionnelle*. Dans quelles mesure l'attention interagit avec la motricité volontaire paraît moins claire,



mais semble faire appel à la même intentionnalité que lorsqu'un sujet pointe volontairement vers un objet, saisit un objet ou se dirige vers un objet. Dans cette perspective, on peut citer l'étude de Brooks, Attree, Rose, Clifford, & Leadbetter (1999). Dans cette étude, les participants exploraient une maison virtuelle composée de quatre pièces comportant des objets. Il leur était explicitement énoncé qu'il devait rechercher un parapluie (qui n'y était pas en réalité), sans que les sujets sachent la nature réelle de cette exploration (tester leur mémoire). Les sujets actifs (ayant le contrôle total de l'environnement au moyen d'un joystick) et passifs appariés selon la procédure « *yoked control* » ont cependant obtenus des performances différentes lorsqu'ils furent testés sur la mémoire spatiale (localisation des objets et mémoire allocentrique) et la mémoire des objets (tâche de reconnaissance). Les premiers obtinrent de meilleures performances sur les tâches de mémoire spatiale tandis que les second sur la tâche de reconnaissance. Cette différence introduit deux constats, le premier étant qu'il confirme l'effet bénéfique de la navigation active, et le second, que ce bénéfice ne serait valable que pour la mémoire spatiale et non pour la mémoire des objets. L'une des explications serait que l'implication de la motricité volontaire orienterait l'attention des sujet plus sur les aspects spatiaux de l'environnement tandis que visiter cet environnement passivement altère cette attention portée sélectivement à l'information spatiale. Or, Wilson & Péruch (2002) ont montré qu'au contraire qu'il n'y avait pas de différence entre les actifs et les passifs que l'attention soit dirigée sur les objets ou vers les aspects spatiaux. Sans surprise, bien évidemment, le fait de diriger l'attention du sujet vers les aspects spatiaux améliore les performances du sujet sur les tâches spatiales et la diriger vers les objets doit donc améliorer les performances de reconnaissance.

L'hypothèse attentionnelle ne semble pas non plus bénéficier du support des études manipulant le caractère intentionnel ou incident de l'encodage car les résultats de Brooks et al. (1999) sont répliqués quel que soit le type d'encodage. Ces études se trouvent dans la lignée directe de la toute première étude de Wilson et collègues (1997), répondant à la problématique de la distinction entre le contrôle moteur et le contrôle cognitif. Selon cette ligne d'études, une focalisation attentionnelle simple ne suffit pas à un bénéfice quelconque de la navigation active, l'attention doit être elle-même active. Autrement dit, le bénéfice de la navigation active ne serait effectif que chez le sujet qui prend des décisions, le rôle du contrôle moteur étant secondaire : il s'agit de *l'hypothèse décisionnelle*. La toute première étude relative à cette hypothèse a montré que le simple fait de décider du parcours (contrôle cognitif), mais aussi de pouvoir diriger le parcours grâce au joystick (contrôle cognitif + contrôle moteur) donnait des performances identiques sur les tâches de

pointages (moindres erreurs de pointage vers les cibles) et de localisation de ces cibles sur une carte prédéfinie de l'environnement comparés à la condition où les sujets n'avaient que le contrôle moteur (Bakdash, Linkenauger, & Proffitt, 2008). De même, plus récemment, Plancher, Barra, Oriols, & Piolino (2012) montrèrent que la navigation active n'impliquant que la prise de décision/l'attention, sans le recours de la motricité permettait d'avoir de meilleures performances aux tests de mémoire visuospatiale, mais de meilleures performances sur la tâche de reconnaissance des objets après une navigation passive (absence de tout contrôle). Aussi, von Stülpnagel & Steffens (2012) faisaient faire à leurs participants le tour d'un parc à vélo mais en tandem, où le contrôle moteur et le contrôle cognitif étaient manipulés. Ainsi le « backseat driver » (le conducteur de vélo assis sur le siège arrière) pouvait être totalement passif dans un cas ou bien avoir uniquement un contrôle cognitif dans l'autre (dirige le conducteur assis à l'avant du vélo ou « frontseat driver », et qui a bien évidemment le contrôle moteur pour manipuler le guidon). De la même manière, apparié au « backseat driver » passif était le « frontseat driver » qui possédait les deux types de contrôles dans le premier cas, et qui ne possédait que le contrôle moteur dans le second cas. Dans leur expérience 1 où les participants n'étaient pas du tout familiers avec le parc, les participants qui n'avaient aucun contrôle (passive « backseat drivers ») et qui n'avaient que le contrôle moteur (passive « frontseat drivers) avaient de meilleurs performances de reconnaissances des *landmarks* tandis que ceux qui possédaient les deux types de contrôles (active « frontseat drivers ») et ceux qui n'avaient que le contrôle cognitif (active « backseat drivers ») avaient de meilleurs performances aux tâches d'orientation spatiale (retrouver le chemin le plus court *survey knowledge*) et d'intégration spatiale (e.g., retracer le chemin sur une carte en 2D pour mesurer le *survey knowledge*). Ces résultats vont par conséquent dans le sens de Plancher et al. (2012), avec de meilleures performances aux tâches de mémoire spatiale allocentrée dans la navigation « active » dès lors qu'une prise de décision est impliquée dans la navigation. Par contre, de meilleures performances aux tâches de mémoire d'objet chez ceux ayant effectué une navigation « passive », comme chez Brooks et al. (1999). Toutefois, il faut noter que les participants ont reçu l'instruction explicite de mémoriser les objets et le trajet pour être ultérieurement testés. Avoir répliqué les résultats précédents avec une instruction explicite de mémorisation signifie que ces caractéristiques de la navigation active pourraient être indépendantes de la nature de l'encodage (implicite vs. explicite).

De manière intéressante, von Stülpnagel & Steffens (2012, expérience 2) ont reconduit l'étude en gardant la même procédure, mais une chose avait changée : seuls les

participants familiers au parc ont été recrutés pour tester l'hypothèse décisionnelle de la navigation active. Les auteurs montrèrent cette fois-ci que les « frontseat drivers », qu'ils aient uniquement le contrôle moteur ou bien les deux types de contrôles, étaient plus performants sur la reconnaissance des objets que les « backseat drivers » toutes conditions confondues. Cette caractéristique particulière ne vaut que pour la mémoire des objets. En ce qui concerne la *survey knowledge* (i.e., tâche d'intégration spatiale), tous les participants qu'ils aient uniquement un contrôle moteur ou cognitif ou encore les deux, avaient nettement de meilleures performances que ceux qui étaient totalement passifs (aucun contrôle). Cependant, il est intéressant de noter que là encore, n'avoir qu'un contrôle cognitif (diriger le trajet), moteur (diriger le guidon) ou bien avoir les deux donne exactement la même performance concernant l'évaluation de la *survey knowledge*. Il faut remarquer que ce résultat singulier souligne combien le contrôle moteur est inséparable du contrôle cognitif, suggérant un traitement top-down dans lequel la décision est un facteur nécessaire et suffisant mais précède le mouvement volontaire lorsque ce dernier est nécessaire. Aussi, la familiarité (ou l'exposition antérieure et répétée aux stimuli) jouerait un rôle cruciale dans la manière dont la navigation active module les performances mnésiques, et plus spécifiquement elle favoriserait l'influence de la navigation active sur la mémoire des objets, sans avoir un effet spécifique sur la mémoire spatiale.

#### ✓ Bases neuroanatomiques de la navigation active

A ce jour, à notre connaissance, seules six études ont comparé la navigation active avec la navigation passive en termes de corrélats neuroanatomiques: Quatre ont étudié les activations uniquement durant la phase d'encodage (Baumann, Chan & Mattingley, 2010 ; Flanagin, Wutte, Glasauer, & Jahn, 2009 ; Jeong et al., 2006 ; Walter, Vetter, Grothe, Wunderlich, Hahn, & Spitzer, 2001) et les deux restantes ont adressé les activations lors de la récupération (Baumann et al., 2010 ; Voss, Gonsalves, Federmeier, Tranel, & Cohen, 2011 ; Wutte, Glasauer, Jahn, & Flanagin, 2012).

Concernant l'encodage, dans l'étude Jeong et al. (2006), les sujets participaient à une activité réelle de conduite automobile. Les actifs conduisaient pendant que les passifs étaient passagers dans le même véhicule. Ces deux groupes étaient comparés à un groupe contrôle dans lequel les participants restaient assis dans une chambre les yeux ouverts. Cette étude de PET scan a révélé une activation d'une ensemble de structures comprenant les aires visuelles primaires et secondaires, l'aire motrice primaire, l'aire prémotrice, l'aire associative pariétale,

les cortex cingulaire et parahippocampique, ainsi que le thalamus et le cervelet chez les navigateurs actifs. Chez les passifs, le thalamus et les cortex cingulaire et parahippocampiques n'étaient pas activés en dehors des autres régions pré-citées. Ces activations des régions pariétales et occipitales sont systématiquement retrouvées quel que soit le mode de navigation (Walter et al., 2001) et quel que soit le type d'activité (Flanagin et al., 2009). Cependant, l'activation du cortex sensorimoteur et du cervelet semble spécifique à la navigation active (Walter et al., 2001). Selon Spiers & Maguire (2007), les régions prémotrices, pariétales et cérébelleuses feraient parties d'un réseau impliqué dans des comportements bien précis tels que démarrer la voiture, tourner, faire demi-tour ou s'arrêter. La planification des actions durant la conduite est associée à l'activation du cortex pariétal supérieur, du cortex occipital latéral ainsi que du cervelet.

Du côté de la mémoire des objets et de leur localisation, Baumann et collègues (2010) demandaient aux participants de naviguer jusqu'à une pyramide jaune qui était l'objet cible parmi des objets contextuels (i.e., de cylindres de différentes couleurs) et de le rappeler en naviguant de nouveau vers la position de cette objet pendant la phase de récupération. Cette activité de navigation durant l'encodage étaient fortement associée à l'activation de l'HC et du CPH.

Concernant la récupération, Wutte et al. (2012) mesuraient les activations cérébrales des sujets se rappelant avoir marché (condition *self-motion* active) comparés au rappel épisodique d'avoir voyagé comme passager (condition *self-motion* passive) et au rappel épisodique de l'observation par ces mêmes sujets d'une autre personne en train de marcher (condition contrôle). Le rappel d'une marche active, impliquant le mouvement de son propre corps, activait sans surprise le cortex sensorimoteur impliqué dans un réseau plus vaste, tandis que le rappel d'être passager activait plutôt les cortex associatifs. Mais l'activation du LTM était commune aux deux conditions, comparée à la condition contrôle qui ne mobilisait que le cortex prémoteur, impliqué dans la planification de l'action.

Pour la mémoire des objets et de leur contexte, Baumann et al. (2010) rapportent que la navigation active durant la phase de récupération était associée à l'HC gauche et au striatum bilatéral, la première étant plus active chez les mauvais navigateurs et la seconde plutôt chez les bons navigateurs. Voss et al. (2011) furent les seuls à spécifiquement étudier l'effet de la navigation active sur les performances en mémoire, et de ce fait, la question posée est la suivante : qu'est-ce qui sur le plan neural rend compte du bénéfice apporté par la navigation active ? Ces auteurs ont montré que le contrôle volontaire des mouvements bénéficie aussi bien à la mémoire des objets ainsi qu'à celle de leur localisation (exp 1 à 3).

Cependant, leur contribution la plus importante reste dans le fait d'avoir démontré un rôle plus spécifique du LTM (i.e., hippocampe) dans ce bénéfice en soumettant des patients amnésiques présentant une lésion sélective de l'HC à ce même protocole (exp 4). Leur résultat le plus spectaculaire montre des bases neuroanatomiques de ce bénéfice différentes pour les deux types de mémoire : les données de neuroimagerie évaluant la connectivité fonctionnelle chez les sujets sains ont montré une plus grande activité hippocampique associée aux activités du CPFDL bilatéral, et du cervelet chez les sujets actifs comparés aux sujets passifs, plus particulièrement pour la mémoire de la localisation spatiale des objets. À l'opposé, pour la tâche de reconnaissance des objets, la connectivité fonctionnelle était plus grande entre l'HC, le cortex pariétal ventro-latéral et le CPH postérieur, incluant le gyrus fusiforme antéromédian. Dans le premier cas, l'identification de ce réseau est consistante avec les études précédentes impliqués plutôt dans les aspects spatiaux de la navigation active, tandis que le second résultat est inédit et semble être consistant avec les études ayant identifié le CPH comme étant impliqué dans la mémoire des items, la récupération des catégories sémantiques des objets étant sous-tendue par le gyrus fusiforme.

L'ensemble de ces études font donc ressortir plusieurs découvertes quant aux bases neuroanatomiques de l'effet d'une navigation active :

1) l'encodage actif n'impliquerait spécifiquement que les régions occipito-pariétales, le cortex sensorimoteur et le cervelet pour la mémoire spatiale tandis que l'encodage actif pour la mémoire des objets et de leur localisation impliquerait respectivement l'HC et le gyrus parahippocampique.

2) la récupération active dans le cas de la mémoire de la mémoire spatiale (semblable à une activité de conduite) impliquerait principalement le cortex sensorimoteur et les aires associatives. En revanche, la récupération active dans le cas de la mémoire des objets nécessiterait l'implication du cortex parahippocampique, du cortex pariétal ventro-latéral ainsi que du gyrus fusiforme.

Notons que l'implication du LTM n'est déterminée que par la nature de la tâche, c'est-à-dire uniquement lorsque les participants doivent intentionnellement mémoriser le trajet, les objets ou leur localisation durant la navigation active. Au-delà des différences liées à la mémoire des objets et à la mémoire spatiale, l'HC semble également jouer un rôle prépondérant plus spécifiquement dans le bénéfice mnésique apporté par la navigation active, mais il est inscrit dans un réseau neuronal plus vaste impliquant également le CPF, soulignant de ce fait la contribution du fonctionnement exécutif aussi bien lors de l'encodage que lors de

la récupération, témoignant de l'interaction entre une activité mnésique et motrice volitionnelle à la fois (Voss et al., 2011).

**Encart 2 : Synthèse du chapitre II et Intérêt de la distinction « traitement item-spécifique vs. Traitement Relationnel » pour l'étude de la mémoire quotidienne**

- ✓ La mémoire quotidienne est un concept représentant le fonctionnement de la mémoire intégrée au sein des activités de la vie quotidienne
- ✓ Pour répondre aux critiques du manque de validité écologique des tests traditionnels et des biais subjectifs inhérents aux questionnaires d'auto-évaluation, la *vérisimilitude* est apparue comme une voie prometteuse pour implémenter une évaluation de la mémoire tout en simulant une situation proche de la réalité quotidienne
- ✓ L'étude de la mémoire des actions (effet SPT) fait partie de ce champ de la mémoire quotidienne utilisant la vérisimilitude
- ✓ Le développement de la RV s'inscrit également dans cette approche de vérisimilitude appliquée au domaine de la psychologie et des neurosciences cognitives ; La mémoire spatiale est abondamment étudiée grâce à cette technologie mais des lacunes persistent du côté de la mémoire des objets quotidiens
- ✓ La disponibilité des divers modes d'interactions (e.g., joystick) avec les environnements virtuels a permis d'étudier la problématique de la relation entre la mémoire et l'action ; Si la plupart des études ont étudiée cette relation dans le champ de la mémoire spatiale en comparant la navigation active à la navigation passive, elle a été peu abordée concernant la mémoire des objets, et dans les deux cas les résultats sont contradictoires.
- ✓ Toutefois, il apparaît que l'effet bénéfique de la navigation active semble plutôt s'observer en situation d'encodage intentionnel et lorsque la situation quotidienne dans laquelle s'opère la navigation active est familière au participant c'est-à-dire basée sur des « schémas de connaissances ».
- ✓ Plusieurs hypothèses ont été émises pour rendre compte de tels résultats. Notamment, un parallèle entre l'effet SPT et la navigation active a été proposé dans lequel la dichotomie traitement item-spécifique vs. Relationnel permet d'expliquer les résultats contradictoires en proposant que l'effet positif de l'activité motrice est le résultat d'un meilleur traitement item-spécifique dans un contexte de traitement relationnel des similitudes et, qu'en conséquence, l'effet positif doit être plutôt observé sur des tâches de reconnaissances, plutôt que de rappel libre ou indicé.

## *Chapitre III*

### *Vieillesse, mémoire épisodique, mémoire quotidienne*

Après avoir décrit le fonctionnement de la mémoire épisodique et de la mémoire quotidienne, nous abordons dans le présent chapitre la manière dont les processus relatifs à ces mémoires sont affectés par le vieillissement cognitif. Dans un premier temps, nous allons définir de manière générale, le vieillissement cognitif, puis, en particulier, les modifications du fonctionnement de la mémoire au cours du vieillissement.

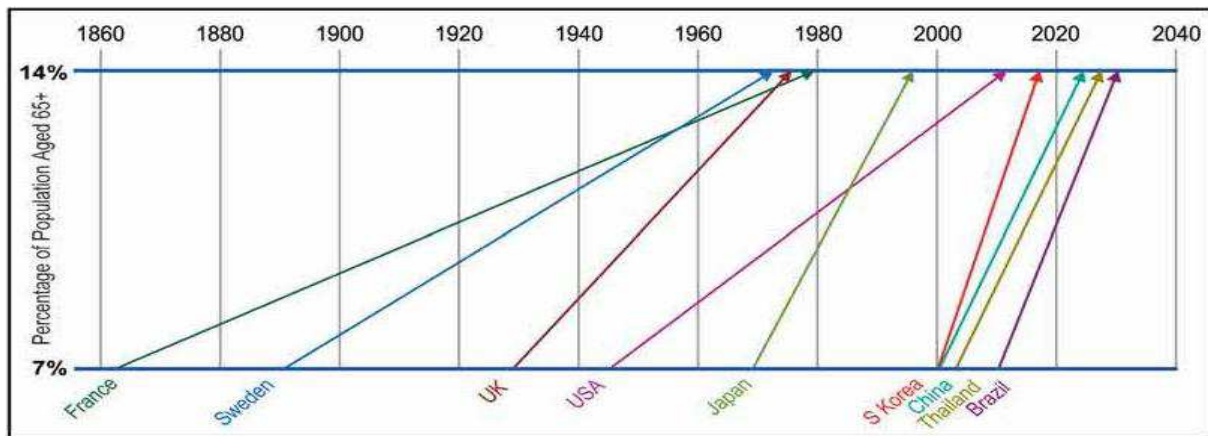
#### **I. Qu'est-ce que le vieillissement cognitif ?**

Il y a huit ans de cela, Timothy Salthouse écrivait dans un article majeur que le « phénomène du vieillissement cognitif a été remarqué pratiquement aussi tôt que celui du vieillissement physique, et pourtant il reste encore mal compris » (Salthouse, 2004). On peut dire qu'entre temps de nombreux articles ont été publiés, repoussant de plus en plus les limites de nos connaissances sur ce phénomène. Néanmoins, cette remarque de Salthouse reste toujours d'actualité. Mais avant d'aborder le caractère « cognitif » du vieillissement, ce dernier en tant que phénomène général reste également mal compris.

#### **1. Qu'est-ce que le vieillissement au juste ?**

Sans être certain de sa véritable nature, nous pouvons juste individuellement affirmer que nous changeons au cours de notre vie et ce changement nous concerne tous. Et ce changement s'opère aussi bien au niveau psychologique, physique, physiologique, génétique que chimique. Selon l'OMS (WHO, 2010), nous vivons aujourd'hui en moyenne 81 ans dans le monde occidental, mais une rapide augmentation a été notée en Asie, avec une espérance de 74 ans en moyenne. L'OMS considère toute personne ayant plus de 60 ans comme une personne âgée (OMS, 2010). Si l'on considère quelques statistiques, au niveau mondial, il y environ 2 milliard de personnes de 60 ans et 400 millions de personnes auront 80 ans en 2050. Cette augmentation est aussi en rapport avec la vitesse de l'augmentation des populations

âgées de plus de 65 ans. Par exemple la France a mis pratiquement 100 ans entre 1880 et 1980 à atteindre un taux de 14 % de personnes âgées de plus de 65 ans, alors qu'en comparaison, ce taux n'a été atteint par la Corée du Sud qu'en une décennie (Kinsella & He, 2009, voir Figure 23).



**Figure 23.** la vitesse à laquelle la population de plus de 65 ans passe de 7% à 14% par pays, aussi bien en termes d'années que de données que projetées (adapté de Kinsella & He, 2009).

Cette réalité démographique a un impact en termes économiques et sociaux, car le nombre important de personnes âgées nécessite une prise en charge au niveau du régime de sécurité sociale et de l'assurance maladie. Les maladies liées à l'âge auront ainsi un enjeu bien plus important qu'elles n'en ont aujourd'hui.

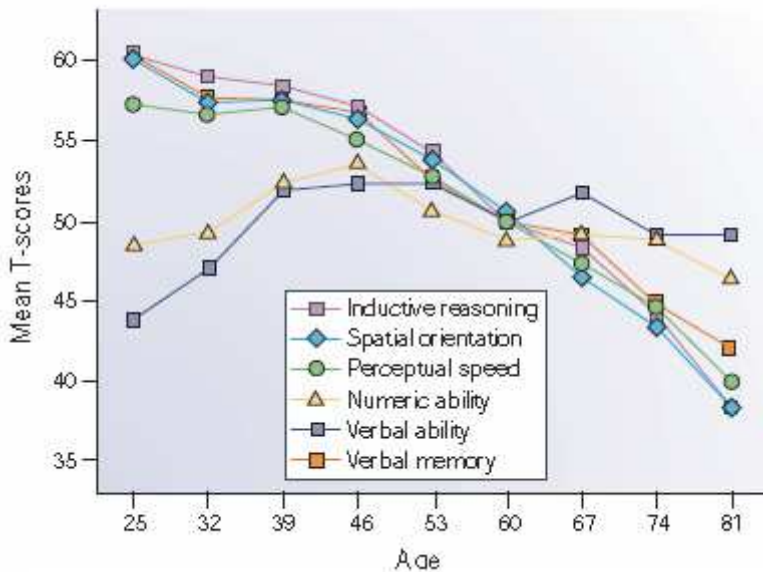
Nos séniors, à partir de 65-70 ans, manifestent des changements nets concernant le fonctionnement cognitif, directement en lien avec le processus de vieillissement de leur cerveau. A la longévité et à la longue liste de maladies liées à l'âge s'ajoute la crainte d'une atteinte neurodégénérative telle que la maladie d'Alzheimer, et à juste titre. En effet, le rapport OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, health data, 2010 ; <http://www.oecd.org/health/healthdata>) considère qu'il y aurait entre 27 et 36 millions de personnes à travers le monde atteintes d'une démence de type Alzheimer. La prévalence de cette démence doublerait même tous les 5 ans à partir de 65 ans.

Une notion qui est importante à saisir lorsqu'on aborde le vieillissement est celle de « lifespan », traduite par « empan de vie » en français. Cette notion représente en fait la longueur de notre vie, autrement le nombre d'années qu'une personne vit... avant qu'elle ne meurt. Si je vis 35 ans, mon empan de vie sera de 35 ans ! Si je vis 100 ans, mon lifespan est de 100 ans. S'il existe des études de cohortes assez ambitieuses et riches en enseignement à ce niveau, elles sont rares et la plupart des études optent pour des études transversales (*cross-*



*sectional studies*), comparant deux ou plusieurs groupes d'âges en termes de performances cognitives (Hofer & Sliwinski, 2006). Ce types d'études sont avantageuses car les chercheurs peuvent recueillir les données, mesurer les performances cognitives à un instant donné en s'épargnant les biais et les contraintes liés aux études longitudinales (e.g., mortalité associées aux études de cohorte, l'effet Flynn,...), comparer les différentes tranches d'âges mais aussi les âgés avec d'autres populations, notamment celles présentant des neuropathologies (e.g., Delis et al., 1991). L'une des conséquences majeures de ces comparaisons transversales est de pouvoir mettre en place des tests comportementaux dont nous pouvons estimer le degré de spécificité et de sensibilité, nécessaires aux études cliniques et diagnostics, puisque l'une des questions majeures liées à la reconnaissance de conditions neurologiques telles que la maladie d'Alzheimer qui sous-tendent la recherche en psychologie, en gérontologie, en gériatrie et en neurosciences cognitives du vieillissement est la suivante : à quel moment doit on considérer les déclin cognitif chez les personnes âgées comme relevant de la pathologie ? Cette question motive aussi bien la recherche dans le domaine du vieillissement tel qu'on le conçoit dans la normalité que dans le domaine des pathologies liées à l'âge. Par conséquent dans le présent chapitre nous nous concentrons d'une part principalement sur les études plutôt transversales (nous mentionneront les études longitudinales uniquement si elles semblent pertinentes pour notre propos).

Lorsque l'intérêt scientifique fut porté sur le vieillissement cognitif, un certain nombre de phénomènes ont pu être observés. Ainsi savons nous que certaines capacités et fonctions cognitives déclinent au cours du vieillissement, tandis que d'autres restent relativement stables. Par exemple Schaie (1996) avait rassemblé des études adoptant l'approche transversale, effectuées auprès d'échantillons allant de 25 à 81 ans. Le pattern qu'elle mettait en exergue était, avec l'âge, un déclin net dans les domaines tels que le raisonnement inductif, l'orientation spatiale, la vitesse de traitement perceptuelle, et bien entendu la mémoire verbale, que nous aborderons plus particulièrement dans les prochaines sections. En revanche, les capacités verbales en soi et les capacités numériques, relevant toutes deux du fonctionnement du langage, augmentaient jusqu'à environ 45 ans, puis se stabilisaient jusqu'à la fin de la vie (voire Figure 24). Notons l'écart important entre les performances des jeunes ayant en moyenne 25 ans et les âgés à partir de 60 ans. Nous présentons un certain nombre d'explications avancées pour rendre compte de ces observations.



**Figure 24.** Changements cognitifs liés au vieillissement, à partir de données transversales issues de l'étude longitudinale de Seattle (adapté de Schaie, 1996).

## 2. Théories générales du vieillissement cognitif

Dans l'hypothèse générale d'une réduction des ressources cognitives avec l'âge (Birren, 1988), trois principales formulations théoriques ont été proposées : 1) un déclin des ressources attentionnelles ; 2) une diminution du fonctionnement exécutif ; 3) un ralentissement de la vitesse de traitement.

### 2.1. Déclins attentionnels dans le vieillissement normal

L'effet de l'âge n'est pas toujours observé sur des tâches d'attention soutenue (e.g., Parasuraman, 1989), définie comme la capacité de mobiliser les ressources de traitement sur une tâche donnée (e.g., détecter un signal rare et imprédictible) pendant des durées prolongées (Sarter, Givens, & Bruno, 2001). Toutefois, il semblerait que le degré de réduction dans les performances dans les tâches de vigilance varie en fonction du degré de complexité de la tâche ou bien du degré de dégradation du stimulus et ceci, à plus forte raison chez les âgés. Par exemple dans une tâche de discrimination de chiffre, Parasuraman, Nestor & Greenwood (1989) ont démontré que le fait de varier le degré de dégradation du stimulus diminuait le taux de réponses correctes au cours des essais ainsi que la sensibilité ( $d'$ ), particulièrement chez les âgés comparés au jeunes. En utilisant toutefois des tests neuropsychologiques, comme le SART (Sustained Attention to Response Test, Robertson, Manly, Andrade, Baddeley, & Yiend, 1997), une récente étude effectuée auprès de plus de 600 sujets âgés entre 14 et 77

ans rapporte que les capacités d'attention soutenue augmenteraient durant la jeunesse, et tendrait à se stabiliser chez les personnes âgées (Carriere, Cheyne, Solman, & Smileck, 2010).

Les âgés ont également des performances moindres comparées à celles des jeunes sur des tâches d'attention sélective ou d'inhibition (Chao & Knight, 1997). Par exemple, dans une tâche de recherche visuelle, Oken, Kishiyama, & Kaye (1994) avaient montré que les âgés ont un temps de réaction plus long et font plus d'erreurs que les jeunes, de plus ce pattern serait particulièrement plus important dans une tâche nécessitant une recherche sérielle plutôt que parallèle. En utilisant des mesures plus physiologiques comme le nombre de fixations oculaires, le nombre de saccades et la dilatation pupillaire, Porter et al. (2010a) ont également pu montrer dans une tâche de recherche visuelle impliquant une conjonction de caractéristiques des stimuli qu'en dépit d'une dilatation des pupilles équivalentes entre les jeunes et les âgées, impliquant une égale mobilisation des ressources attentionnelles, le nombre de saccades et la longueur du temps de fixation étaient plus important chez ces derniers comparés aux premiers. Cette étude montre que le pattern de recherche visuelle pour identifier une cible devient plus conservatrice avec l'âge, interprétée comme une préservation des capacités d'intégration des caractéristiques (*feature integration*) au prix d'effort cognitif considérable particulièrement pour un traitement sériel (étape ultérieure dans l'intégration des caractéristiques), comparé à un traitement parallèle (étape précoce de l'intégration), et plus automatique (Treisman & Gelade, 1980). Les auteurs concluent non pas à un déficit des ressources attentionnelles, mais plutôt à un déficit d'un accès à ces ressources permettant de mettre en place des stratégies efficace d'intégration des caractéristiques dans la détection des stimuli face à des distracteurs complexes.

Les tâches d'attention divisée (i.e., lorsque plusieurs stimuli doivent être détectés simultanément ou bien lorsqu' au moins deux tâches doivent être accomplies en même temps, nécessitant la mobilisation des ressources de traitement aussi importante pour l'une que pour l'autre, Posner & Petersen, 1990) montrent également une sensibilité importante à l'âge (Verghese et al., 2002). Généralement l'attention divisée est évaluée en laboratoire en demandant aux sujets d'effectuer deux tâches simultanément, tout en mesurant leurs performances aux deux tâches, en comparaison à la réalisation de ces deux tâches l'une après l'autre ou de manière alternative. En utilisant un paradigme similaire, McDowd & Craik (1988) ont montré que la différence liée à l'âge dépendrait en fait de la complexité de la tâche. Dans leur étude, les expérimentateurs présentaient simultanément des mots pour lesquels les sujets devaient répondre s'ils faisaient partie d'un être vivant et des lettres pour lesquels ils devaient juger si elles étaient des consonnes. Cette tâche a révélée une différence liée à l'âge

aussi bien sur des mesures de TR que d'erreurs, comparé à la tâche contrôle. Lorsque les deux tâches sont réalisées simultanément, le risque d'interférence de l'une sur les performances de l'autre est important, aboutissant à des erreurs dans l'une comme dans l'autre (pour une revue, voire Pashler & Johnston, 1998).

L'ensemble de ces observations de déclin sur les tâches d'attention sélective et divisée, induite par une réduction des ressources attentionnelles chez les âgés, ont amenés Hasher & Zacks (Hasher, Lustig, & Zacks, 2007) à proposer *l'hypothèse du déficit d'inhibition*. Selon ces auteurs, l'efficacité à réaliser des tâches impliquant ces formes d'attention nécessite des capacités d'inhibition des informations potentiellement interférentes, comme cela peut être le cas par exemple dans une tâche de recherche visuelle de conjonction lorsque l'on doit trouver une Peugeot bleue parmi des Peugeot blanches (facile) *et* des Renault également bleues (plus difficile!). Les différences liées à l'âge sur l'attention divisée seraient expliquées donc par un déficit dans la capacité générale de résister à l'interférence produite par les informations non-pertinente à la tâche, autrement à la capacité à les inhiber chez les personnes âgées. Une hypothèse qui n'est pas incompatible avec *l'hypothèse exécutive* (voire ci-après) de manière plus générale, puisque les processus d'inhibition régulent selon ces auteurs le flux d'entrée et de sortie des informations dans la mémoire de travail (voire ci-après). Ainsi, une information pénétrant dans la mémoire de travail devrait être normalement inhibée si elle n'est pas pertinente.

## 2.2. Hypothèse exécutive du vieillissement cognitif

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 (Zamarian et al., 2008), la flexibilité cognitive (Henri & Philips, 2006), l'inhibition (Hamilton & Martin, 2005) ou encore la planification (Andrès & Van der Linden, 2000). Récemment, les scores obtenus par les personnes âgées aux tests exécutifs ont également été corrélés de manière significative au volume cortical préfrontal (Gunning-Dixon & Raz, 2003) dont l'atrophie est à la fois précoce dans le vieillissement (De Carli et al., 2007) et plus importante que celle d'autres régions corticales (Raz et al., 2005). Ces observations générales appuient *l'hypothèse fronto-exécutive du déclin cognitif* dans le vieillissement (Braver & West, 2008). Ainsi, afin de mesurer la flexibilité mentale, et plus particulièrement le processus de switching entre tâches (capacité à alterner les tâches) DiGirolamo et ses collègues (2001) ont par exemple demandé aux jeunes et aux âgés d'effectuer deux tâches,

l'une consistant à juger si le chiffre présenté visuellement est supérieur ou inférieur à 5 (tâche de jugement de la valeur numérique) et l'autre consistant à juger si le nombre présenté contient des chiffres supérieurs ou inférieurs à 5 (tâche de jugement de la contenance numérique), ces deux tâches pouvaient se suivre au cours d'un même bloc d'essai d'une manière pseudo-randomisée sans que le sujet puisse déterminer à l'avance quelle tâche il devait effectuer. Cette situation d'incertitude demandait en plus de la part du sujet la mobilisation de la mémoire de travail, nécessitant le maintien de la règle de la tâche précédente. Une tâche contrôle était également administrée dans laquelle les sujets ne devaient effectuer que l'une ou l'autre de ces tâches. Les auteurs ont pu montrer que les âgés comme les jeunes avaient un TR plus élevé dans cette tâche de switching comparé à la tâche contrôle, cependant ils ont également observé une interaction montrant que cette différence était plus élevée chez les âgés comparés aux jeunes. Les âgés commettaient également significativement plus d'erreurs que les jeunes quelle que soit la condition (contrôle vs. switching). A cela, les résultats d'IRMf ont montré que les jeunes comme les âgés activaient le CPFDL (BA 44, 45, 46, 47) et le cortex fronto-médian (BA 6 et 32) qui étaient spécifiques à la tâche de switching, cependant à la différence des jeunes ces aires étaient également activées chez les âgés lors de la tâche contrôle, résultats qui suggèrent que des tâches très simples ne nécessitant que peu d'effort chez les jeunes semblent être réussies au prix d'un effort cognitif chez les âgés encore une fois, mettant en exergue les limites du fonctionnement exécutif des personnes âgées.

### 2.3. Déclin lié à la vitesse de traitement

La section précédente montrait les évidences empiriques en faveur de l'hypothèse exécutive du déclin cognitif dans le vieillissement normal. Cependant autant d'études supportent la *théorie de la réduction de la vitesse de traitement* (processing speed theory, Salthouse, 1996). Selon cette théorie, le déclin cognitif serait le fait d'une diminution généralisée de la vitesse de traitement. Ainsi, les performances dans diverses tâches cognitives seraient expliquées non pas parce que les capacités mesurées par ces tâches sont déficitaires, mais parce que ces tâches sont effectuées avec plus de lenteur par les âgés. Ceci est d'autant plus vrai que les tâches impliquent, comme dans la plupart des cas, des mesures comportementales basées sur le TR ; autrement dit, lorsque les sujets doivent répondre de manière efficace dans un laps de temps relativement court (Salthouse, 1994). Par conséquent, les adultes âgés n'auraient pas le temps de mettre en place des processus cognitifs ultérieurs

quand leur temps est entièrement dédié à l'exécution de tâches pour lesquelles les processus antérieurs ne sont pas encore terminés dans un traitement sériel. Ces performances détériorées se reflètent encore plus lorsque la tâche possède un niveau de complexité élevé (e.g., lorsque le nombre d'opérations ou de stimuli à traiter augmente, lorsque ces stimuli doivent être traités de manière sériels, ...). Empiriquement, ce ralentissement chez les personnes âgées comparées aux jeunes se reflète selon une approche transversale à travers les tests simples mobilisant spécifiquement la vitesse de traitement tels que le *digit symbole substitution test* (ou DSST, Wechsler, 1996) largement utilisé ou bien le *symbol search task* (Deary, Johnson & Starr, 2010), car une mesure de TR relevée à partir de tâches plus complexes (i.e., tâche de décision lexicale) seraient à fonctionnement multi-déterminée. Autrement dit, déterminer la part de variance liée à la vitesse de traitement dans les TR devient difficile sachant que des processus cognitifs de haut niveau entrent aussi en ligne de compte dans la tâche. Ce ralentissement dans n'importe quelle tâche impliquant une réponse dans une durée limitée est un effet tellement robuste, systématiquement reproduit, et décrivant une relation presque toujours linéaire avec l'âge (Salthouse, 1996), que les chercheurs dans le domaine du vieillissement cognitif en sont arrivé à se demander si la vitesse à laquelle les processus cognitifs s'exécutent ne constituerait pas finalement un principe général expliquant le déclin cognitif lié à l'âge dans les domaines cognitifs majeurs tels que l'attention, la mémoire, l'intelligence, les capacités visuo-spatiales, etc. (Hartley, 2006).

Cette théorie peut être testée empiriquement en utilisant des analyses statistiques fines telles que les modèles d'équations structurales, dont les régressions, les corrélations partielles, et les *path analyses* (incluant les analyses factorielles confirmatoires) qui sont les méthodes les plus utilisées (e.g., Penke & Deary, 2010). Elles servent notamment à tester une hypothèse de médiation, dans laquelle la relation statistique entre une variable X (variable indépendante ou « prédicteur ») et Y (variable dépendante) sera « médiée » par une variable latente Z (Baron & Kenny, 1986). Le principe d'une analyse de médiation est simple : si une variable « médie » la relation entre deux autres variables alors le fait de la contrôler statistiquement aura pour conséquence une diminution significative de la relation statistique entre le prédicteur et le critère (voir l'encart 3).

### Encart 3. Principe de l'analyse de médiation. Exemple de la régression hiérarchique multiple.

*Si nous prenons l'exemple des régressions hiérarchiques multiples, et des corrélations partielles, la méthode médiationnelle s'opérationnalise dans le domaine du vieillissement cognitif de la manière suivante : pour les régressions hiérarchiques par exemple, il s'agira dans une première étape de déterminer le pourcentage de variance dans les performances à une tâche cognitive expliquée uniquement par l'âge, qui peut être prise comme une variable dichotomique dans une étude transversale où des groupes d'âges nettement différenciés sont étudiés (i.e., jeunes vs. âgés), c'est le age-related variance (ARV). Cette ARV représente à l'étape initiale de la méthode médiationnelle 100 % de la performance, car une relation causale directe de type  $X \rightarrow Y$  est établie. Dans une seconde étape, la variable médiatrice est ajoutée dans l'équation structurelle (c'est-à-dire que l'effet de cette variable sur la VD est contrôlé), et on regarde alors si cette ARV a significativement diminuée, mieux encore si elle est proche de 0 %. Quantitativement, nous calculons alors la différence liée à l'âge dans cette tâche cognitive particulière (l'ARV après contrôle de la variable médiatrice) en comparant le pourcentage de variance expliqué uniquement par l'âge ( $R^2$  unique) avant le contrôle et après le contrôle ( $R^2$  change) selon la formule suivante :  $\% \text{ ARV} = (R^2 \text{ unique} - R^2 \text{ change}) / R^2 \text{ unique}$ . Ainsi, plus le % ARV due à la variable médiatrice sera élevé plus les chances que le  $R^2$  de l'âge après le contrôle du médiateur soit proche de 0, non-significatif. La corrélation partielle se fonde également sur le même principe, dans laquelle la variance due au médiateur est ajustée avant de regarder la corrélation entre l'âge et la variable cognitive dépendante. Ce modèle de médiation unique peut être intégré dans une analyse plus complexe dans laquelle la relation initiale entre X et Y peut être « « médiée non pas par une seule mais par plusieurs variable médiatrices, qui peuvent elles-mêmes être corrélées, ce qui aboutit à des modèles structuraux complexes du point de vue des mécanismes cognitifs impliqués.*

Appliquée à la théorie de la vitesse de traitement, cette méthode a consisté notamment à prendre la vitesse de traitement comme variable médiatrice entre les performances à diverses tâches cognitives et l'âge dans des études qui ont soit pris cette dernière comme une variable continue (à condition de disposer d'un échantillon très large), ou bien comme variable dichotomique (Bryan & Luszcz, 1996). Ainsi, l'interférence des âgés à la tâche de Stroop serait expliquée par ce ralentissement (Verhaegen & De Meersman, 1998), de même que les performances de mémoire épisodique (Hertzog et al., 2003).

Enfin, tandis que l'hypothèse du déficit d'inhibition et celle du déficit fronto-exécutive apparaissent comme étant apparentées, il est généralement considéré que la théorie de la vitesse de traitement et l'hypothèse exécutive sont directement incompatible, du fait d'une distinction en termes de processus entre le fonctionnement exécutif et la vitesse de traitement. Des études récentes ont alors pu directement confronter ces deux hypothèses (e.g., Albinet et al., 2012 ; Lee et al., 2012). Ces études récentes suggèrent que la vitesse de traitement tout

comme le fonctionnement exécutif contribuerait aux effets de l'âge sur les performances d'intelligence, de mémoire, et d'autres fonctions, cependant, la première aurait un rôle plus important. De plus, il semblerait que le fonctionnement exécutif et la vitesse de traitement ne soient pas tout à fait indépendant, lançant alors le débat sur le fait de savoir si la vitesse de traitement elle-même n'agirait pas sur le fonctionnement exécutif (e.g., Cepeda, Blackwell, & Munakata, 2013), qui en retour induiraient les différences liées à l'âge sur d'autres fonctions cognitives telles que la mémoire ou la capacités visuo-spatiales (Brown, Brockmole, Gow, & Deary, 2012 ; Salthouse, Atkinson, Berrish, 2003).

## **II. Vieillesse et mémoire épisodique**

La présente section propose une revue de l'effet de l'âge sur différents processus relevant de la mémoire épisodique en nous limitant à ceux présentés dans les chapitres précédents, et notamment ceux à l'étude en clinique de la mémoire de la personne âgée. Puis, nous visiterons les hypothèses explicatives.

### **1. Effet du vieillissement sur les processus de mémoire**

#### *1.1. L'apprentissage*

Il semblerait que les capacités d'apprentissage soit préservées chez les personnes âgées, mesurées notamment en utilisant les tests traditionnels de mémoire verbale tels que le Hopkins Verbal Learning Test, le CVLT ou encor le RAVLT qui, comme nous l'avons vu dans le chapitre I, utilisent la procédure de multiples essais de rappel libre (Friedman, Schinka, Mortimer, Graves, 2002). Toutefois, elles apprennent moins rapidement que les jeunes en raison de leur performance de rappel libre moindre comparée à celle des jeunes (Lamar, Resnick, Zonderman, 2003). Par exemple, Davies, Small, Stern, Mayeux, Feldstein, & Keller (2003) ont utilisé une tâche de rappel libre au cours de multiples essais afin de comparer plusieurs tranches d'âge (30-45, 46-60, 61-75, et 76-90 ans) sur l'apprentissage au cours de 5 essais successifs, suivis d'un rappel et d'une tâche de reconnaissance différés soit de 20 mn soit de 1 jour. Ils ont montré que la capacité d'apprentissage était conservée quel que soit le groupe mais les deux groupes les plus âgés avaient un rappel total après 5 essais moindre que les deux premiers, qui montraient un effet plafond.

Au total, il apparaît que les mécanismes d'apprentissage soient préservés dans le vieillissement, bien qu'indéniablement le niveau de départ d'acquisition soit toujours en deçà du sujet jeune.



## 1.2. Stratégie d'encodage : le regroupement sémantique

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le regroupement sémantique permet chez les jeunes adultes d'augmenter les performances de rappel lors de la phase d'apprentissage, lorsque les items d'une liste font partie de catégories sémantiques. Il est en général constaté que lorsque la liste est « bloquée » (*Blocked* en anglais), c'est-à-dire lorsque la liste est présentée en regroupant par avance les items par catégorie, les âgés en bénéficient autant que les jeunes non seulement en termes d'une augmentation du nombre de regroupements mais aussi en termes de performances de rappel libre, ce qui est moins le cas lorsque les items sont présentés selon un ordre pseudo-randomisé dans lequel deux items appartenant à la même catégorie sémantique ne se suivent pas (Wegesin, Jacobs, Zubin, Ventura, & Stern, 2000). Remarquons que la condition « blocked » améliorerait aussi bien le rappel que la reconnaissance, surtout lorsqu'il fallait rechercher en mémoire la source d'un item (e.g., cet item a-t-il été présentée par la voix féminine ou la voix masculine ?). Ces résultats furent répliqués par la suite, et furent associés à la capacité de trouver les mots chez les âgés, c'est-à-dire la fluence sémantique plutôt qu'aux autres tests de mémoire de travail, d'attention ou de raisonnement (Jacobs, Rakitin, Zubin, Vutura, & Stern, 2001). Cependant, alors que le fait de mettre en évidence ou de diriger le rappel en donnant des indices sémantiques augmente l'utilisation de la stratégie de regroupement, les études semblent moins catégoriques sur les bénéfices apportés sur le rappel libre chez les âgés. Par exemple, Woo & Schmitter-Edgecombe (2009) montrèrent que la différence en termes de regroupement sémantique entre les jeunes et les âgés disparaissaient lorsque la méthode d'indication sémantique était utilisée, mais les performances de rappel des âgés restent toujours aussi faibles par rapport aux jeunes. Cette capacité de regroupement sémantique chez les âgés uniquement dépendante de la nature pré-organisée du matériel verbal semble également valable pour du matériel non verbal (e.g., des formes géométriques, des dessins, des photographies ou encore des objets réels) (Sharp & Gollin, 1988). Cependant, il est intéressant de constater que ce pattern ne semble valable que pour la mémoire verbale et visuelle. En effet, lorsque le paradigme d'apprentissage par rappel libre au cours de multiples essais utilisé par le CVLT est transposé à la mémoire des odeurs, les âgés ont des performances très faibles non seulement sur le rappel libre immédiat après les essais d'apprentissage, mais aussi de rappel indicé, de rappel différé mais surtout d'utilisation du regroupement sémantique comparés aux jeunes (Nordin & Murphy, 1998). Remarquons de

plus que la présence de l'allèle APOE-epsilon 4 n'est pas souvent contrôlé chez les personnes âgées bien portantes, pourtant son rôle dans la démence de type Alzheimer a été suggéré comme facteur de risque (Kim, Basak, Holtzman, 2009). Les personnes âgées porteuses de la variante e-4 de cet allèle montrent généralement de moins bonnes performances que les personnes âgées non-porteuses sur l'ensemble des processus de la mémoire épisodique, et notamment sur le regroupement sémantique et présentent plus de chances de conversion vers une démence (Bondi et al., 1995).

Au total, l'ensemble de ces études indique que les regroupements sémantiques en rappel libre sont plus facilement réalisés lorsque le matériel est préalablement organisé ou encore que les scores de catégorisation corrigés pour le nombre de mots rappelés sont inchangés avec l'âge (Sauzéon et al., 2001), révélant pour les auteurs tout simplement que l'accès automatique au contenu de la mémoire sémantique est intact dans le vieillissement (Hoyer & Verhaegen, 2006).

### *1.3. Processus de récupération : différences entre les tâches de rappel et de reconnaissances*

Lorsque la tâche de rappel libre est considérée isolément de l'apprentissage, en tant que tâche de récupération, comme dans un paradigme de rappel isolé (*single trial free recall paradigm*, Metcalfe & Murdock, 1981), une différence liée à l'âge est observée (Bäckman & Nilsson, 1984). Cependant, sur les tâches de reconnaissance, les résultats montrent toujours des performances supérieures aussi bien chez les jeunes que chez les âgés par rapport au rappel libre avec même parfois une normalisation de la performance chez le sujet âgé (e.g., Craik & McDowd, 1987), car l'item à reconnaître constitue finalement son propre indice de récupération. Ainsi, l'information non-accessible durant le rappel le devient durant la reconnaissance, montrant que celle-ci n'avait pas totalement disparue de la mémoire. Cependant, il n'est pas encore formellement établi si les différences liées à l'âge disparaissent ou persistent sur les tâches de reconnaissances. La plupart des travaux dans ce domaine datent de la fin des années 60 et des années 70, mais rares sont les études qui se sont penchées sur cette question ces dernières années (Danckert & Craik, in press). En effet, certaines études comparant les jeunes aux âgés sur la reconnaissance d'items de type Oui/Non montrent une suppression-ou une diminution substantielle-de l'effet de l'âge (Botwinick & Storandt, 1980), tandis que d'autres montrent au contraire que les âgés performant moins bien que les jeunes sur ce type de tâche même si au global les deux groupes réussissent mieux la reconnaissance que le rappel (Craik & McDowd, 1987 ; Dankert & Craik, in press). La dernière étude menée

par Danckert & Craik (in press) vient récemment de conclure à un résultat intermédiaire où une différence liée à l'âge est bien constatée en rappel libre comme en reconnaissance mais que l'effet de l'âge est substantiellement plus important pour la tâche de rappel comparée à la reconnaissance (bénéfice augmenté de la reconnaissance chez les âgés mais performance non normalisée).

#### 1.4. Processus d'oubli actif: l'interférence proactive

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'interférence proactive peut être évaluée grâce à de nombreuses procédures. Et l'effet de l'âge sur la sensibilité à l'interférence proactive semble dépendre du type de tâche utilisée. Par exemple, dans les tâches d'empan complexe (e.g., *operation span task*, Unsworth, Heitz, Schrock, & Engle, 2005), dans lesquels le matériel à encoder (une tâche d'opération arithmétique apparié à un mot) est répété au cours de plusieurs essais successifs en commençant par présenter un nombre restreint de mots lors du premier essai en augmentant le nombre de mots lors des essais successifs suivants, un effet de l'âge est trouvé, où les mots de l'essai antérieur interfèrent avec le rappel des mots de l'essai suivant (Emery, Hale, & Myerson, 2008 ; May et al., 1999). En revanche, lorsque l'ordre de la présentation des mots est inversée lors des essais successifs, en commençant par présenter une liste longue jusqu'à réduire le nombre de mots lors des essais suivants, l'effet d'interférence disparaît aussi bien chez les jeunes que chez les âgés (May et al., 1999).

Une autre manière d'évaluer l'interférence proactive est d'utiliser le paradigme des paires associés AB-AC dans lequel le paradigme de rappel libre multi-essai peut-être incorporé : par exemple, au cours des essais successifs, les participants doivent apprendre une paire de mots AB dans laquelle le mot A constitue l'indice (ou l'amorce) et le mot B la cible à rappeler. Puis les mêmes mots A sont couplés à des mots C lors d'un nouvel essai. Dans ce type de paradigme, un effet d'interférence plus important a été montré pour les âgés (le fait de rappeler moins de mots C) comparés aux jeunes (Ebert & Anderson, 2009). Lorsqu'une nouvelle liste de mots sémantiquement reliés est présentée à chaque essai sans pour autant qu'ils soient appariés, on montre également une construction de l'interférence proactive (*build-up of proactive interference*, Wickens, 1972), un effet de l'âge plus important est noté (Hasher, Chung, May, & Foong, 2002).

Cependant, les résultats quant aux différences liées à l'âge sont plus mitigés lorsque la même liste de mots sémantiquement reliés est présentée au cours de plusieurs essais successifs. Par exemple, Ebert & Anderson (2009) montrèrent que les âgés comme les jeunes

sont susceptibles à l'interférence de la liste cible (A) sur la liste B, mais que la différence entre les deux listes est moindre chez les âgés comparés aux jeunes. En revanche, une procédure similaire utilisée par Constantinidou & Baker (2002) en administrant un test comme le CVLT a montré au contraire de meilleures performances de rappel libre à la liste B comparée à la liste A, un effet inversé à celui attendu, un peu à la manière d'une suppression de l'effet d'interférence (*release from proactive interference*, Wickens, 1972). Cette étude montre que cet effet d'interférence inversé (*reverse proactive interference*, Thapar, 1996) peut aussi être observé chez les âgés, effet qui à ce jour n'a pas été élucidé.

### 1.5. Fausses reconnaissances

Les adultes âgés sont sensibles aux fausses reconnaissances, c'est-à-dire à la tendance à reconnaître comme ayant été étudié des événements qui ne l'ont en fait jamais été, ou bien à associer un événement au mauvais contexte (Schacter, 2001). En utilisant le paradigme Deese-Roediger-McDermott (Deese, 1959 ; Roediger & McDermott, 1995), cette susceptibilité a été montrée chez les âgés qui commettent alors des fausses reconnaissances sémantiques ou *gist-based false recognitions*, c'est-à-dire des items nouveaux qui présentent toutefois un lien sémantique avec les items cibles (Budson, Sullivan, Daffner, & Schacter, 2003 ; pour revue Gallo, 2010). Aussi, ils reconnaissent plus d'items comme ayant été précédemment étudiés dans un autre contexte, faisant alors des fausses reconnaissances de source ou *source-based false recognitions*, soit en utilisant les paradigmes traditionnels comme nous l'avons montré précédemment, mais aussi en couplant l'attribution de la source avec la paradigme de Loftus montrant le *misinformation effect* (Mitchell, Johnson, & Mather, 2003). Ainsi, les âgés sont plus susceptibles d'endosser une information qui ne leur a été que suggérée comparés aux jeunes. A notre connaissance, une seule étude a pu comparer les deux types de fausses reconnaissances chez les âgés (Pierce, Sullivan, Schacter, & Budson, 2005) au moyen d'un paradigme DRM modifié dans lequel les sujets étaient soumis à une tâche de reconnaissance de type Oui/Non après une phase d'étude dans laquelle les participants étaient invités à accomplir une tâche d'orientation manipulant le niveau de traitement (superficiel vs. profond). Certains de ces items utilisés pour la tâche d'orientation étaient ensuite étudiés dans une liste séparée pour chacun des deux types de traitements, constituant la source cible, et la tâche d'orientation constituant la source non-cible. Ainsi, la tâche de reconnaissance comportait non seulement des items cibles provenant des listes étudiées mais aussi des leurres critiques provenant de la tâche d'orientation : des leurres mixtes (source et relié

sémantiquement) superficiels et profond, des leurre sémantiques purs, des leurre sources pures (non-reliés sémantiquement mais étudiées durant la tâche d'orientation) profonds et superficiels. Les auteurs rapportent une performance équivalente en termes de reconnaissance correcte entre les jeunes et les âgés, mais plus de fausses reconnaissances de manière générale chez les âgés comparés aux jeunes. De manière intéressantes, ils montrèrent un taux de fausse reconnaissances de source purs équivalent entre les deux groupes d'âge mais un taux de fausse reconnaissances mixtes plus important aussi bien chez les âgés que chez les jeunes surtout après un traitement superficiel comparés aux fausses reconnaissances sémantiques pures.

## **2. Hypothèses explicatives du déclin mnésique avec l'âge**

Trois principales hypothèses sont actuellement à l'étude dans le domaine du vieillissement de la mémoire: 1) déclin de la mémoire de source et/ou défaut de monitoring; 2) défaut des traitements item-spécifiques ; et 3) déclin fronto-exécutif.

### *2.1. Déclin de la mémoire de source et ou des mécanismes de mémoire associative*

De nombreuses études ont pu montrer que la mémoire de la source est déficitaire chez les personnes âgées bien portantes comparées aux jeunes en utilisant des protocoles traditionnels dans lesquels des mots sont présentés dans deux ou plusieurs contextes (sources) différents tels que des voix masculines ou féminines ou des personnes différentes (Glisky & Kong, 2008) ou encore si l'information a été présentée sous format vidéo ou bien en tant que photographie (Schacter et al., 1997). Le cadre théorique de la mémoire de source et du monitoring de la source proposé par Johnson et al. (1993) a été initialement opérationnalisé en comparant la mémoire des événements vécus (étudiés) aux événements imaginés, introduisant le processus plus spécifique de monitoring de la réalité (*reality monitoring*). Les recherches ont également montré une moins bonne habileté des âgés à opérer la distinction entre ce qui a été précédemment étudié et ce qui a juste été imaginé (Hashtroudi, Johnson, & Chrosniak, 1989). Un effet de l'âge est aussi constaté sur la mémoire des items (*item memory*), cependant la taille de l'effet est généralement moins important que celui observé sur la mémoire de la source (voir la méta-analyse de Old & Naveh-Benjamin, 2008). En explorant les caractéristiques phénoménologiques des attributions correctes et incorrectes, il a été rapporté que la similarité perceptuelle ou sémantique entre les items appartenant à différentes sources conduit les âgés à plus de confusions (Henkel, Johnson, & De Leonardis, 1998). En d'autres

termes les difficultés des âgés à juger/monitorer de la véracité d'un souvenir proviendrait au départ d'un défaut de mémoire de source<sup>1</sup>.

Ce défaut de mémoire de source est également avancée pour rendre compte des moindres performances de rappel (Long, Öztekin, & Badre, 2010) ou encore la sensibilité des âgées aux fausses reconnaissances (McCabe, Presman, Robertson, & Smith, 2004) ou à l'interférence proactive (Burns, 1989 ; Burns, 2006). Par exemple, le rappel libre serait moins efficace chez les âgés, résultat de leur moindre capacité à encoder la source/le contexte de manière efficace. Quant à la sensibilité des âgés à l'interférence proactive, celle-ci résulterait aussi d'un défaut d'encodage de la source amenant les âgés à confondre des événements d'autant plus qu'ils présentent des similitudes sémantiques ou perceptives (Schacter, Koutstaal, & Norman, 1997). Dans la mesure où une explication commune est avancée pour différents phénomènes mnésiques sensibles à l'effet de l'âge (défaut de mémoire de source), certains auteurs considèrent également les fausses reconnaissances comme une instance d'interférence (Grady et al., 1995) résultant particulièrement de la familiarité des items avec les sources non-ciblés, qu'elles soient extérieures ou intérieures (résultant d'une similarité perceptuelle et/ou sémantique, Dywan & Jacoby, 1990 ; Koutstaal & Schacter, 1997).

Dans ce contexte, Johnson et ses collègues (e.g., Johnson, De Leonardis, Hashtroudi, & Ferguson, 1995) proposent un déclin chez les personnes âgées à associer les éléments de contenu et de contexte ensemble afin de construire un souvenir épisodique riche en détails (perceptuels, spatiaux et temporels). Cette hypothèse est à rapprocher à celle d'un déficit de *binding* ou d'un déficit associatif émise par Naveh-Benjamin (2000) qui met également en exergue des difficultés concernant les mécanismes de mémoire eux-mêmes dont le rôle est d'associer et de mettre du liant entre le contenu de l'information et son contexte apparition pour constituer une trace mnésique épisodique. Ces déclins associatifs sont observés chez le sujet âgé pour du matériel verbal mais aussi pour du matériel visuel comme des images (Naveh-Benjamin, Hussain, Guez, & Bar-On, 2003) et plus récemment avec pour des paires objet/localisation de l'objet dans l'espace ou objet/ordre temporel de leur présentation (Kessels, Hobbel, & Postma, 2007).

---

<sup>1</sup> Des auteurs proposent que ce n'est pas tant la mémoire de source qui engendre des difficultés de mémoire chez la personne âgée mais plutôt les mécanismes de monitoring des souvenirs qui seraient des processus stratégiques (Cf. hypothèse fronto-exécutive, ci-après) (Gallo et al., 2001). Cette idée est défendue par exemple par des manipulations de la phase de récupération permettant soit de diminuer les fausses reconnaissances, soit de les augmenter artificiellement comme répéter la présentation des items (Edmonds, Glisky, Bartlett, & Rapcsak, 2012) avertir les participants pour les inciter à modifier le critère de décision ou encore présenter les items lors de récupération dans le même format (e.g., visuel) que lors de l'encodage (Gallo et al., 2001).

## 2.2. *Déficit du traitement item-spécifique*

Ce déficit associatif/binding chez les âgés n'est pas tout à fait étranger au fait que le binding, dans la mesure où des événements visuellement riches sont concernés, permet de créer des épisodes hautement spécifiques et différenciables d'autres événements épisodiques présentant des similarités perceptuelles ou conceptuelles, c'est-à-dire de les rendre distinctifs. Encore une fois, comme pour l'évaluation du binding, celle de l'évaluation de l'effet d'un traitement item-spécifique n'est qu'hypothétique puisqu'inférée à partir de certaines manipulations faites durant l'encodage et les performances obtenues sur les tâches de récupération.

### 2.2.1. Traitement item-spécifique : le cas du rappel et de la reconnaissance

Il a été suggéré que les traitements mettant plus l'accent sur les caractéristiques distinctives des événements sont déficitaires chez les âgés (Hunt, 2012). Ceci expliquerait les différences liées à l'âge sur les tâches de rappel, qui sont considérées comme reposant à la fois sur un traitement item-spécifique (sur le versant production d'items individuels) et sur un traitement relationnel (sur le versant « catégorisation sémantique ») (Burns, 2006). En revanche, l'âge ne semble pas avoir d'effet sur le traitement relationnel, notamment lorsqu'il s'agit de regrouper les items selon leur appartenance à une catégorie sémantique. Cette préservation est bien entendue fortement dépendante de la préservation de la mémoire sémantique. Par exemple, dans l'étude de Sauzéron et al. (2006), les jeunes et les âgés devaient apprendre une liste de mots reliés sémantiquement (condition « matériel relationnel ») ou non (condition « matériel item-spécifique ») pour laquelle une mesure du traitement item-spécifique (e.g., nombre de mots gagnés d'un essai au suivant) ainsi qu'une mesure de traitement relationnel (e.g., regroupement sémantique mesuré en calculant l'ARC score) ont été prélevées. Les auteurs purent montrer que les âgés rappelaient moins de mots dans la condition « matériel item-spécifique » comparée à la condition « matériel relationnel », révélant alors une différence liée à l'âge plus importante dans la première condition et s'étiolant dans la deuxième. De plus, au niveau des indicateurs item-spécifiques (e.g., mesure du gain) les différences liées à l'âge étaient observées quel que soit le type de matériel. L'effet de l'âge n'était pas présent sur l'indicateur relationnel (ARC score) ? Ces résultats sont d'une part en faveur de l'hypothèse d'un déficit du traitement item-spécifique, et d'autre part d'une préservation du traitement relationnel basé sur les traitements sémantique.

Selon cette hypothèse, le rappel libre serait moins efficace que la reconnaissance car le rappel libre repose sur le traitement item-spécifique lorsqu'il s'agit d'auto-initier la production des mots isolés de la liste (Long et al., 2010), ce que les âgés ont beaucoup de difficulté à effectuer en comparaison à une tâche de reconnaissance où l'information item-spécifique est disponible et accessible sur un support extérieur, diminuant fortement l'effort cognitif lié à l'auto-initiation des stratégies de récupération (Craik & McDowd, 1987).

### 2.2.2. Traitement item-spécifique et fausses reconnaissances

Le déficit du traitement item-spécifique contrastant avec la relative préservation du traitement relationnel a aussi été considéré comme une interprétation possible de la susceptibilité plus grande aux fausses reconnaissances chez les personnes âgées comparées aux jeunes (e.g., Thomas & Sommers, 2005), qu'il s'agisse des fausses reconnaissances de source (Pierce et al., 2005) ou bien des fausses reconnaissances sémantiques (Balota et al., 1999). Si cela est bien le cas, augmenter la distinctivité du matériel à apprendre pourraient réduire cette susceptibilité aux fausses reconnaissances. Dans les travaux effectués essentiellement auprès d'une population jeune, il a été en effet constaté que le fait de présenter les mots en couleurs différentes ou bien en polices différentes des autres mots (e.g., Arndt & Reder, 2003) permet de réduire les fausses reconnaissances, puisque ces items ont été rendus distinctifs lors de l'encodage. De même, Israel & Schacter (1997) constatèrent que les fausses reconnaissances dus à l'effet DRM étaient considérablement réduites lorsque les mots de la liste étaient présentés en modalité visuelle plutôt que par présentation auditive. Ils supposèrent alors que l'effet de modalité permet une meilleure discrimination des items cibles des items leurres activés dans le réseau sémantique de manière automatique, un processus qu'ils appelèrent *heuristique de distinctivité*. Suivant cette logique, mais cette fois-ci chez les âgés, Thomas & Sommers (2005) ont par exemple pu montrer que les fausses reconnaissances étaient réduites chez les jeunes et les âgés lorsque des mots étaient intégrés à des phrases sémantiquement congruentes (e.g., « l'orange était cultivée avec soin »), éliminant la différence liée à l'âge. D'autres ont montré une réduction des fausses reconnaissances due à un encodage distinctif, sans réduction de l'effet de l'âge sur les fausses reconnaissances (Koutstaal, Shacter, Galluccio, & Stofer, 1999 ; Pierce et al., 2005).

Ou encore, des études montrent au contraire un effet délétère d'un encodage distinctif, augmentant alors les fausses mémoires des âgés (Butler, McDaniel, McCabe, & Dornburg, 2010 ; Smith, Lozito, & Bayen, 2005). D'ailleurs, l'étude de Butler et al. (2010) apporte un



éclairage nouveau sur la nature des traitements item-spécifique et leur relation avec l'âge. En effet, alors que la plupart des études citées ci-haut manipulent le traitement item-spécifique (vs. une condition standard d'apprentissage de la liste DRM) en apportant une distinctivité *extérieure* comme support environnemental (Craik & Simon, 1980), les participants de Butler et al. (2010) devaient utiliser une stratégie propre à eux pour rendre les mots de la liste DRM distinctifs (par exemple en pensant en associant le mot « CHIEN » avec une caractéristique qui faisait de ce mot un item unique, en pensant par exemple au nom de leur propre chien, « OSCAR »). Les personnes âgées étaient sujets à plus de fausses mémoires dans la condition item-spécifique et elles étaient plus reliées au fonctionnement exécutif comparé à la condition standard. Cette étude révèle que les traitements item-spécifiques spontanément mis en œuvre par les personnes âgées sont déficitaires augmentant alors leur propension à commettre des fausses reconnaissances.

Au total, en distinguant un traitement item-spécifique dirigé par le données (e.g., présentation visuelle du matériel à apprendre) d'un traitement item-spécifique auto-initié, généré intentionnellement, il apparaît que le premier est moins affecté par l'âge que le second. Dans ce dernier cas, il est aisé de faire le lien avec l'hypothèse environnementale de Craik & Simon (1980) d'un déficit d'auto-initiation des stratégies, mais aussi avec l'hypothèse du déclin fronto-exécutif (voir ci-après).

### 2.2.3. Exemple de l'effet SPT

L'étude de Butler et al. (2010) n'est qu'un cas particulier de nombreuses études utilisant diverses manipulations lors de l'encodage afin de rendre celui-ci plus distinctif. Cependant, en dépit d'une démonstration d'un bénéfice apporté par de tels manipulations sur le rappel et les reconnaissances correctes chez les jeunes du à des effets basés sur le principe de distinctivité tels que l'*effet d'isolation* (Geraci, McDaniel, Manzano, & Reodiger, 2009), ou encore l'*effet de génération* (Mitchell, Hunt, & Schmitt, 1986), les études présentent des résultats contradictoires quant à la présence ou à l'absence d'un effet de l'âge ou quant à sa réduction. L'effet d'enactement (ou effet *subject-performed task* -SPT, Brooks & Gardiner, 1994 ; Dijkstra & Kaschak, 2006 ; Feyereisen, 2009 ; Rönnlund, Nyberg, Bäckman, & Nilsson, 2003) n'échappe pas non plus à la règle.

La littérature est peu abondante en ce qui concerne la question de savoir si l'effet SPT apporte un bénéfice sur les performances en mémoire chez les personnes âgées. La plupart des études faites dans ce domaine ont adopté la procédure classique consistant à comparer les

jeunes et les âgés sur deux conditions au moins : une condition dans laquelle les phrases d'actions ou des verbes d'actions sont appris verbalement (*verbal encoding*), et une condition dans laquelle ces phrases sont exécutés en réel (*subject-performed task, SPT*). Si l'hypothèse d'un effet additif (Engelkamp, 2001) du processus item-spécifique apporté par l'information motrice est juste, si l'on considère la tâche SPT plutôt automatique, alors les âgés devraient en profiter autant que les jeunes. Cependant, si l'on considère l'information motrice comme intégrée dans un encodage plutôt multimodal lors de la performance motrice (Bäckman, 1985) alors on pourrait même s'attendre à ce que les différences liées à l'âge soient diminuées. Bäckman (1985) fut l'un des premiers à poser ce type de question et montra que l'effet SPT était présent chez les jeunes comme chez les âgés, et apportait un bénéfice aux âgés. Il a été de plus montré que cet effet ne dépend pas de la congruence sémantique des phrases d'actions (Mangels & Heiberg, 2006), c'est-à-dire, que les âgés bénéficieraient de cet effet indépendamment du fait qu'on apporte une intégration sémantique à la phrase (e.g., « la pomme est mise dans le panier ») ou pas (e.g., « la pomme est mise sur la trousse »). Nyberg et al (2002) ont analysé les performances de 1000 participants âgés de 35 à 80 ans, et ont montré que seuls 5% des participants (une majorité de personnes très âgées) ne présentaient pas l'effet SPT. Nyberg et ses collaborateurs ont identifié comme causes possibles de la perte de l'effet bénéfique du SPT un dysfonctionnement du traitement moteur (via des indicateurs biologiques et neuropsychologiques) corroborant les résultats des études en neuro-imagerie qui montrent un lien entre l'effet SPT et les régions motrices du cerveau.

D'autres études ne corroborent pas ces résultats, et rapportent trois cas de figures : le premier étant un bénéfice apporté par la condition SPT sans élimination de l'effet de l'âge (Dijkstra & Kaschak, 2006 ; Feyereisen, 2009 ; Mangels & Heinberg, 2006 ; Nilsson & Craik, 1990), le second étant une absence totale de supériorité de la condition SPT par rapport à la condition verbale, un effet de l'âge étant retrouvé dans les deux conditions (Brooks & Gardiner, 1994 ; Guttentag & Hunt, 1988 ; Knopf, 1991). Ainsi, Knopf (1991) montra que quelle que soit la condition (verbale vs. SPT), une différence liée à l'âge était présente aussi bien sur le rappel libre que sur la reconnaissance, qu'elles soient immédiate ou différée. Et, enfin, Nilsson & Craik (1990) montrent un bénéfice apporté par la condition SPT chez les âgés sans pour autant effacer les différences liés à l'âge sur le rappel tandis que sur la reconnaissance ces différences sont diminuées. Ainsi, le bénéfice augmenté de l'effet SPT chez les âgés pourrait dépendre de la tâche de restitution, et s'exprimerait seulement sur la reconnaissance.

Dans l'ensemble, il n'existe pas vraiment de consensus sur le fait que la condition SPT élimine l'effet de l'âge. Pour résumer, l'ensemble de ces études pointent vers un déficit du traitement item-spécifique, expliquant non seulement un accès réduit aux informations de nature perceptuelles produisant un profil mnésique particulier décrivant un rappel réduit, une reconnaissance correcte intacte dans la plupart des cas, mais une plus grande susceptibilité aux fausses reconnaissances.

### *2.3. Hypothèse fronto-exécutive du déclin de la mémoire épisodique*

Dans la mesure où le monitoring durant la récupération (ou post-récupération selon les auteurs, Allan, Wolf, Rosenthal, & Rugg, 2001) mais aussi une auto-initiation du traitement item-spécifique ou de celle des mécanismes de mémoire de source sont des processus stratégiques et nécessitant un effort cognitif, de nombreux auteurs ont fait l'hypothèse qu'ils ont en commun d'être dirigés par un contrôle exécutif (e.g., working-with-memory model, Moscovitch, 1992 ; Braver & West, 2008), appliquant ainsi l'hypothèse fronto-exécutive au vieillissement de la mémoire. Des évidences supportant cette hypothèse proviennent aussi bien des études utilisant soit des méthodes de statistiques de médiation et de corrélation soit des méthodes purement expérimentales.

#### *2.3.1. Les méthodes corrélationnelles et médiationnelles*

Pour la première approche par exemple, en utilisant les méthodes statistiques décrites dans la section 2.1.3. et l'encart 3, les chercheurs ont montré que la relation entre l'âge et les performances relatives à diverses composantes de la mémoire épisodique sont médiées par le fonctionnement exécutif (Crawford et al., 2000; Souchay, Isingrini, Espagnet, 2000 ; Salthouse, Atkinson, & Berrish, 2003). Des études plus simplement corrélationnelles montrent aussi une association entre les performances mnésiques et les tests mesurant le fonctionnement exécutif, corroborant l'idée selon laquelle certains processus épisodiques sont fortement saturés en processus contrôlés et stratégiques. Par exemple, Parkin & Walter (1992) ont montré que les âgés donnent moins de réponses Remember (R) comparés aux réponses Know (K), en accord avec l'idée de difficultés de recollection contrastant avec une familiarité préservée, mais que ces réponses R sont significativement corrélées aux mesures exécutives. Cette association a aussi été obtenue entre les performances à la tâche d'attribution de la source et les tests exécutifs, suggérant que le monitoring de la source est un processus contrôlé par l'administrateur central (Ranganath, Johnson, & D'Esposito, 2003). Remarquons

qu'une sous-classe d'études adoptant cette approche a même permis de tester l'hypothèse du déclin exécutif contre l'hypothèse de réduction de la vitesse de traitement (e.g., Beaudoin, Clarys, Vaneste, Isingrini, 2009 ; Lee et al., 2012). Ces études montrent en général une contribution importante (mais pas nécessaire équivalente en termes de variance) des deux ressources de traitement au déclin de la mémoire épisodique. Ce type de résultat met en évidence le fait que les deux hypothèses peuvent ne pas être mutuellement exclusives afin de rendre compte des différences liés à l'âge sur les performances en mémoire épisodique, d'autant plus que le rôle de la vitesse de traitement comme un construit séparé de celui de fonctions exécutives est actuellement encore en débat (Albinet, Boucard, Bouquet, & Audiffren, 2012 ; Baudoin et al., 2009).

### 2.3.2. Les méthodes expérimentales

Les travaux pionniers menés par Elizabeth Glisky et son équipe (Glisky & Kong, 2008 ; Glisky, Rubin, & Davidson, 2001) ont consisté à administrer une batterie de tests neuropsychologiques à des personnes âgées évaluant aussi bien la mémoire épisodique (ME) que les fonctions exécutives (FE). Dans un second temps, les participants sont subdivisés en « *high performers* » (+) et en « *low performers* » (-) sur la base des performances en mémoire épisodique et en fonctionnement exécutifs. Grâce à cette méthode (Glisky et al., 1995), ils purent montrer qu'une meilleure attribution de la source (« est-ce que cette phrase a été dite par cette voix ? ») est obtenue chez les âgés EF+ (sans prendre en compte leurs performances ME) comparés aux EF-. Dans un second temps, les ME+ obtiennent de meilleures performances de reconnaissance pour la mémoire des phrases comparés aux ME-. Cette étude fut donc la première à montrer une double dissociation fonctionnement exécutif/mémoire de la source vs. mémoire épisodique/mémoire des phrases, la première considérée comme reposant sur le cortex préfrontal tandis que la seconde mobilisant le lobe temporal médian. Butler et al. (2010) (cités ci-haut) ont repris cette approche dans leur expérience 2 afin de montrer que ce déficit manifeste sous forme de susceptibilité accrue aux fausses reconnaissances n'est présent que chez les âgés bien portant présentant néanmoins un déficit du fonctionnement exécutif (FE-) sans dépasser le seuil défini pour le qualifier de pathologique.

Une autre méthode expérimentale mise en place par Donald Stuss et collègues (Levin, Stuss, & Milberg, 1997 ; Stuss, Craik, Sayer, Franchi, & Alexander, 1996) consiste à directement comparer les personnes âgées bien portantes aux patients présentant des lésions

frontales, connus pour manifester un dysfonctionnement exécutif. Une telle approche neuropsychologique peut sembler surprenante, cependant elle suit le raisonnement suivant : si les âgés et les patients frontaux présentent des performances mnésiques similaires sur divers composantes de la mémoire épisodique et du fonctionnement exécutif alors cela apporte un soutien considérable à l'hypothèse de déficit exécutif. Par exemple, Stuss et al. (1996) comparaient des jeunes contrôles, des adultes d'âge moyen et des adultes âgés à trois groupes de patients présentant des lésions frontales latéralisées droite, gauche et bilatérales en utilisant le paradigme de rappel libre multi-essais (voire chapitre I pour une description d'un tel paradigme au moyen du CVLT). Tous les participants devaient apprendre au cours de 4 essais successifs une liste de mots non-reliés, une liste de mots reliés sémantiquement mais présentés dans un ordre pseudo-randomisés et une liste de mots reliés mais présentés en mode « blocking » (cf, infra, section II.1.). Ce type de procédure permet de mettre en évidence plusieurs résultats intéressants : d'abord, comme nous l'avons vu dans la section II.1., tous les groupes sans exceptions obtinrent de meilleures performances de rappel libre des mots de la liste « blocked », en revanche seul les jeunes et les moyennement âgés purent rappeler de manière optimale les mots des deux autres listes (non-reliée et reliés pseudo-randomisée) comparés aux autres groupes. Globalement, les rappels libre des âgés et des patients unilatéraux droite étaient identiques alors que les âgés surpassaient les unilatéraux gauche. Sur la tâche de reconnaissance, les jeunes et les âgés avaient des performances correctes identiques, cependant la différence entre les âgés et les unilatéraux droit était minime. La différence en termes de fausses reconnaissances n'était pas significative non plus entre les âgés et les trois groupes de patients.

L'approche de comparaison directe entre les âgés et les patients avec des lésions focales est pertinente pour tester l'hypothèse du déficit exécutif du vieillissement normal. Néanmoins, une comparaison avec d'autres populations de patients connus pour avoir des troubles exécutifs mais aussi un réduction de la vitesse de traitement peut tout aussi bien être un moyen efficace de tester l'une ou autre des hypothèses expliquant le vieillissement cognitif. Adoptant cette stratégie, des études relativement récentes ont comparés les âgés bien portant par exemple à des patients traumatisés crâniens (TC) dans les lésions ne sont pas bien délimitées (lésions axonales diffuses). En effet les patients avec un TC sont connus non seulement pour leur dysfonctionnement exécutif mais aussi pour la réduction de leur vitesse de traitement. Ces études se sont cependant avant tout concentrées sur l'hypothèse exécutive et montrèrent des performances similaires entre les personnes âgées et les TC en termes de rappel libre (Vakil & Tweedy, 1994), en termes de fausses reconnaissances de source (Ozen,

Skinner & Fernandes, 2010), mais aussi en termes d'un oubli de la composante rétrospective de la mémoire prospective (Kliegel, Eschen, Thöne-Otto, 2004). A notre connaissance l'hypothèse du ralentissement cognitif n'a pas encore été examinée à l'aide d'une telle approche neuropsychologique.

Dans l'ensemble, ces études sont consistantes avec les études de neuroimagerie séparément effectuées chez les personnes âgées bien portantes et les patients TC montrant un pattern d'activation des aires corticales préfrontales similaires en utilisant le même paradigme d'apprentissage des paires. Par exemple, les participants jeunes et âgés dans l'étude de Cabeza et al. (1997) devaient former une association sémantique (encodage profond) entre deux mots d'une paire présentée durant la phase d'étude. Durant la phase test le premier mot constituant l'indice était présenté, les participants devant alors rappeler le second mot de la paire qui constituait en fait la cible. A l'aide d'un H<sub>2</sub><sup>15</sup>O-PET scan administré aux participants durant les deux phases, il a été possible de montrer un effet de latéralisation chez les jeunes concernant une activation préfrontale gauche pour l'encodage et une activation préfrontale droite pour la récupération, appelé effet HERA (Hemispheric Encoding Retrieval Asymmetrie). Chez les âgés cet effet était considérablement réduit, montrant une activation préfrontale bilatérale (modèle HAROLD pour Hemispheric Asymmetrie Reduction in Older adults, Cabeza, 2002). Cet effet HAROLD est également obtenu chez les patients TC en utilisant la même procédure par cette même équipe (Levine, Cabeza, McIntosh, Black, Grady, & Stuss, 2002), suggérant alors que les patterns de performances mnésiques identiques obtenus entre les âgés et les patients cérébro-lésés (avec une prépondérance pour les lésions frontales ou les troubles dysexécutifs) auraient également des corrélats neurofonctionnels identiques.

## **II. Etude du Vieillissement de la mémoire quotidienne à l'aide d'applications RV**

Si les avantages offerts par la RV ont été rapidement valorisées dans les recherches menées auprès de l'adulte cérébro-lésé (e.g. Klinger et al., 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.

## 1. Contraintes de l'utilisateur âgé pour l'usage de dispositif RV

Quatre principales contraintes à l'utilisations de la RV auprès d'utilisateurs âgés étaient alors dénoncés (McGee et al., 2000) : 1) La techno-phobie (anxiété à utiliser de nouveaux produits) ; 2) le statut perceptivo-moteur ; 3) le mal des simulateurs<sup>2</sup> ; 4) la complexité d'utilisation des Interfaces Homme-Machine (IHM). Avec la présence accrue d'IHM 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 (e.g. simplification des modalités de commande de l'interface) (Hawthorn, 2000 ; Czaja et al., 2006). 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 (e.g. Whitbourne, 1998), il est possible de les contourner en ayant recours aux nombreuses interfaces et interacteurs multisensoriels qu'offrent les dispositifs de RV (pour revue voir Fuchs et al. 2006). Rappelons également que la perception 3D sollicitée dans les applications de RV est préservée jusqu'à un âge avancé (plus de 75 ans) (Yetka, Pickwell et Jenkins, 1998). Concernant le mal des simulateurs, il est rapporté dans la littérature qu'il s'agit d'un phénomène marginal (5%-10%) même s'il augmente un peu avec l'âge<sup>3</sup> (Liu, Watson et Miyazaki, 1999). Il est de plus possible, de minimiser ces effets secondaires en suivant des recommandations simples comme privilégier un mur d'affichage plutôt qu'un casque de visualisation (e.g., Regan et 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 et facile d'utilisation et donc moins anxiogènes pour la personne (Czaja et al., 2006).

---

<sup>2</sup> Troubles résultant d'un conflit entre les informations perceptuelles reçues par les diverses modalités sensorielles (visuelle, proprioceptives...) pendant après l'utilisation de l'environnement virtuel. Les symptômes peuvent inclure des nausées, une fatigue oculaire, une désorientation, des problèmes de coordination perceptivo-motrice, etc. (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1994) mesurés par le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ, Kennedy et al., 1994).

<sup>3</sup> 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).

Ces progrès interficiels amènent aujourd'hui au déploiement des applications RV dans les études neuro-comportementales de la personne âgée. De plus, l'aspect ludique et le sentiment d'efficacité étant importants, les personnes âgées manifestent une véritable satisfaction à l'utilisation de ce mode d'évaluation (pour revue Déjos, Sauzéron et N'Kaoua, 2012).

Concernant spécifiquement la mémoire épisodique en situation quotidienne, actuellement très peu d'études sont à disposition, hormis celles fournies par Plancher et al (2008 ; 2010 ; 2012)

## **2. Travaux réalisés**

Motivés par 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 différentes composantes de la mémoire épisodique (quoi, où, quand, détails et un test de reconnaissance). Deux types d'encodage ont été effectués (incident et intentionnel). Leurs résultats principaux sont, un effet du vieillissement 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 au fait 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.

D'autres travaux existent mais ils concernent uniquement la composante spatiale de la mémoire épisodique à l'aide de tâche de navigation ou de tâches de mémoire spatiale (pour revue, Taillade, et al., 2013). Un effet délétère de l'âge est également constaté sur ces aspects spatiaux de la mémoire, notamment concernant la navigation dans de grands espaces (pour revue, Foster, DeFazio et Bizon 2012). Jusque vers la fin des années 90, une difficulté majeure liée justement à la taille réelle de l'environnement dans lequel nous évoluons rendait difficile, sinon impossible d'étudier la mémoire spatiale de manière réaliste dans l'espèce humaine alors que des dispositifs très efficaces existaient déjà pour l'étudier chez les animaux non humains, le



plus souvent de rongeurs (e.g., Martin & Clark, 2007). Ces dispositifs permettaient par conséquent d'étudier les effets de l'âge chez ces animaux (pour une revue sur la neuropsychologie cognitive du vieillissement chez les rongeurs, voir Foster et al., 2012). L'un des dispositifs très utilisé est par exemple le *Morris Water Maze* (ou piscine de Morris, Morris, 1981). Il s'agit d'une piscine circulaire qui peut être remplie à moitié d'eau. Le rongeur relâché dans la piscine a une tâche précise, celle de retrouver une plateforme invisible car submergée sous l'eau et placée à un endroit fixe (généralement dans l'un des quadrants du cercle décrit par la piscine). Des indices visuels sont placés autour de la piscine le long d'un mur, l'idée étant de faciliter la navigation spatiale du rongeur en fonction de la nature de ces indices (indices proximaux ou distaux). L'expérimentateur peut de ce fait mesurer le temps passé par le rongeur dans un quadrant, le temps mis pour atteindre la plateforme invisible, la distance totale à traverser la piscine jusqu'au point cible...Le développement de la RV fut donc une réelle opportunité afin d'étudier les effets de l'âge sur l'aspect spatial de la mémoire et la navigation dans les environnements à grande échelle dans l'espèce humaine et ce dispositif de Morris put alors être transposé dans un environnement virtuel pour la première fois par Moffat & Resnick (2002). Ces auteurs montrèrent ainsi que les âgés mettent une plus longue distance que les jeunes à atteindre la plateforme cible et sont incapables d'utiliser les indices visuels distaux afin de localiser la plateforme cachée. Au cours des essais d'apprentissage, ils mettent également plus de temps à atteindre la cible que les jeunes. Ces résultats témoignent non seulement du ralentissement de la vitesse de traitement déjà constaté dans les études antérieures au moyen de tests traditionnels de laboratoire, mais aussi d'un déficit d'utilisation d'une stratégie spatiale allocentrique inférée à partir de l'utilisation unique d'indices proximaux. Ces résultats ont reproduits très fidèlement les effets de l'âge déjà constatés chez les rongeurs en utilisant le même dispositif (Ghallagher, Burwell, & Burchinal, 1993).

En transposant l'évaluation traditionnelle de la mémoire épisodique telle que le paradigme de d'apprentissage par multiple essais de rappels libres à l'étude de la mémoire spatiale, Moffat, Zonderman, & Resnick (2001) mirent également en évidence les effets de l'âge sur une tâche de wayfinding dans un labyrinthe virtuel, et rapportèrent des résultats similaires aux études sur la mémoire verbale.

Une critique majeure de ces études réside dans leur manque de validité écologique. Mais, un déclin des performances chez les âgés pour des tâches de mémoire spatiale de route a été également rapporté lorsque des environnements plus réalistes ont été utilisés, et ceci qu'il s'agisse de tâche de mémoire de la configuration de l'environnement, du trajet réalisé ou encore des objets ou points de repères rencontrés (Cushman et al., 2008)

### 3. Bénéfice mnésique de la navigation active dans le vieillissement

De nombreuses études concernent la manipulation « navigation active vs. Passive » dans le domaine de la mémoire spatiale (voir chapitre II), à notre connaissance, seules deux études ont évalué le bénéfice potentiel de la navigation active sur la mémoire épisodique/spatiale dans le vieillissement cognitif.

Par exemple, dans l'étude de Plancher et al. (2008), les participants actifs qui conduisaient la voiture dans le Paris virtuel n'amélioraient pas leurs performances de rappel et de reconnaissance par rapport aux participants passifs qui leur était appariés. Au contraire, l'étude de Taillade et al. (2013) montrait au contraire un effet délétère de la navigation active chez les âgés sur leurs performances de reproduction de trajet en termes de taux d'hésitation lorsque le participants se trouve au niveau d'un carrefour mais aussi en termes d'erreurs de direction. Cet effet négatif de la navigation active était associé à une moindre qualité de la mémoire configurationnelle de l'environnement et était de plus chez les âgés corrélé au fonctionnement exécutif, suggérant l'implication d'un effet de double tâche (i.e., division de l'attention entre la tâche motrice consistant à manipuler le joystick pour diriger la navigation et la tâche d'encodage du trajet durant la navigation). Par contre, la mémoire du trajet et des points de repères n'étaient pas affectées par la manipulation « navigation active vs. passive ».

A la lumière de ces travaux si peu nombreux, il est difficile de conclure à un effet bénéfique d'une navigation active chez les personnes âgées. Ce résultat est surprenant dans la mesure où de nombreux auteurs ont assimilé chez le sujet jeune l'effet bénéfique d'une navigation active à l'effet d'enaction/effet SPT (cf. Chapitre II). De plus, comme nous l'avons vu précédemment l'effet SPT est préservé, voire même pourrait être augmenté, dans le vieillissement. Une explication à cela pourrait être la nature des tâches qui sont utilisées dans les deux études précédentes. En effet, un effet SPT est surtout attendu sur les tâches de reconnaissance d'items isolés impliquant les traitements item-spécifiques, et, ceci plus particulièrement lorsque le matériel à l'étude favorise les traitements sémantiques relationnels (cf. Chapitre I). Or, ce type de tâche n'est pas présent dans ces deux études. En effet, Plancher et al. (2012) utilisent bien une tâche de reconnaissance mais il s'agit de phrases décrivant des objets ou des relations entre objets impliquant nécessairement des traitements relationnels. Ainsi un protocole expérimental mieux armé pour évaluer les traitements item-spécifiques et relationnels pourrait permettre d'éclaircir l'effet d'une navigation active sur les performances de mémoire chez la personne âgée.

#### **Encart 4 : Résumé du chapitre III.**

- ✓ Le vieillissement est un processus naturel au cours duquel s'opèrent des changements physiques mais aussi cognitifs. Des hypothèses ont été proposées pour expliquer le déclin cognitif lié à l'âge (i.e., déclin attentionnel, réduction de la vitesse de traitement, ou un déclin fronto-exécutif...)
- ✓ La distinction « traitement item-spécifique vs. Traitement relationnel » pourrait rendre compte des effets du vieillissement sur les performances de mémoire avec une altération particulière des traitements item-spécifiques, expliquant chez les âgés un rappel libre diminué comparé à la reconnaissance, une sensibilité aux fausses reconnaissances et à l'interférence proactive, déclin contrastant avec une préservation des traitements relationnels impliqués dans la catégorisation des informations à l'encodage.
- ✓ L'hypothèse d'un déclin des traitements item-spécifiques, en particulier dits « auto-initiés » n'est pas sans lien avec l'hypothèse fronto-exécutive du déclin mnésique.
- ✓ L'effet SPT dans le vieillissement normal semble globalement préservé mais son bénéfice augmenté avec l'âge pourrait dépendre du type de tâche à la récupération (notamment les tâches de reconnaissance).
- ✓ L'étude de la mémoire quotidienne des objets n'a été que très peu étudiée dans le vieillissement normal et les études sur le bénéfice éventuel d'une navigation active sont quasi-inexistantes.

---

---

## PARTIE 2 : APPROCHE EMPIRIQUE

---

---

## Chapitre IV

# Objectifs des travaux de recherche et Méthodologie déployée

### **I. Objectifs**

Pour résumer, dans le *chapitre 1*, nous avons décrit différents processus cognitifs mis en jeu lors de la phase d'encodage (e.g., apprentissage, catégorisation sémantique, association item-contexte ou binding,...) et de la récupération (e.g., « vraie mémoire » et fausses mémoires) se rapportant au modèle de la mémoire épisodique et qui sont classiquement sondés lors d'un examen clinique de la mémoire. En particulier, nous avons fait un éclairage de la littérature à travers la distinction « traitement item-spécifique vs. Traitement relationnel ». L'approche traditionnelle de l'étude de la cognition évalue ces processus dans un cadre « aseptisé » du laboratoire rendant difficile le lien avec la cognition quotidienne et en conséquence critiquable en termes de validité écologique. La question de savoir si les mécanismes mnésiques et cognitifs, comme l'effet de l'activité motrice (effet SPT) sur les traitements item-spécifiques, mis à jours par les approches traditionnelles de laboratoires (décrits dans le *chapitre 1*) sont également valides en situation réelle/quotidienne reste ouverte.

Les limites des deux principales approches de la cognition quotidienne ont été présentées (vérisimilitude et véridicalité), et les applications de la RV sont actuellement pressenties par la communauté scientifique comme une voie prometteuse pour dépasser ces limites, à savoir offrir des situations écologiques sans compromettre le contrôle et l'objectivité des mesures recueillies (*chapitre 2*). En particulier, l'effet de l'activité motrice peut être évalué à travers la manipulation du mode de navigation (passif vs. actif) dans l'EV, et pourrait selon certains auteurs être assimilé à un effet SPT.

Enfin, dans le *chapitre 3*, nous avons présentés les grandes avancées apportées par l'approche de la psychologie et de la neuropsychologie traditionnelles dans la compréhension

du vieillissement cognitif (faits expérimentaux, hypothèses explicatives comme un déclin du traitement item-spécifique ou encore l'hypothèse fronto-exécutive) tout en déplorant la paucité des études utilisant la RV pour questionner le vieillissement de la mémoire quotidienne. Aussi, nous avons vu que certaines études tendent à montrer que l'effet SPT serait préservé dans le vieillissement voire, permettrait d'optimiser la performance mnésique de la personne âgée. Cependant, dans les quelques études réalisées avec des applications RV, l'activité motrice n'a jamais été abordé en termes de bénéfice possible pour la performance de mémoire épisodique en situation quotidienne.

Par ailleurs, en filigrane du *chapitre 3*, nous avons cité des études comparatives incluant des sujets jeunes, des sujets âgés et des patients neurologiques. Notamment, nous avons évoquées les études incluant des participants jeunes traumatisés crâniens (TC) dont l'objectif était de mettre en lumière un profil mnésique similaire chez les âgés et chez les TC en vue de mettre à jour un facteur commun d'origine, à savoir un dysfonctionnement fronto-exécutif. De la même manière, les études comparatives qui incluent cette fois-ci des patients avec maladie d'Alzheimer en stade précoce, visent d'une part à différencier le vieillissement « normal » d'un vieillissement neuro-dégénératif, et d'autre part, à comprendre les effets des lésions de la MA dont les origines concernent essentiellement les structures médio-temporales, essentiellement au fonctionnement de la mémoire épisodique.

Dans cette thèse, nous proposons par conséquent d'étudier les processus mnésiques à l'encodage et à la récupération se rapportant à la mémoire épisodique dans le vieillissement normal et dans deux neuropathologies : le TC du jeune adulte (*étude 1*) et la MA de la personne âgée (*étude 2*). Dans un souci de validité écologique de nos travaux, nous avons ainsi opté pour une approche mixte associant la vérissimilitude (test basé sur une situation de la vie quotidienne simulée en RV) à la véridicalité (examiner le lien des performances objectives avec les mesures subjectives telles que le plainte mnésique).

En continuité avec cette approche écologique, nous avons également pris avantage de la possibilité d'interaction sensorimotrice apportée par la technologie RV. La présente thèse s'est donc proposée plus spécifiquement d'investiguer l'effet de la navigation active sur les mécanismes de mémoire à l'étude en situation quotidienne, et ceci chez le sujet jeune d'abord (*étude 3*), puis chez le sujet âgé (*étude 4*). Là aussi, le parti pris de cette thèse, est de se référer à la distinction «traitement item-spécifique vs. relationnel » en faisant un parallèle avec les travaux précédents autour de l'effet SPT, et de s'attendre par conséquent un effet bénéfique de

la navigation active sur les tâches dites comme impliquant les traitements « items-spécifiques ».

Au total, les expérimentations dans le chapitre suivant ont été mises ne place pour répondre notamment aux questions suivantes :

- 1) Existe-t-il des effets d'âge en mémoire épisodique lorsque celle-ci est incorporée dans une situation écologique, c'est-à-dire proche de la vie quotidienne par rapport aux évaluations traditionnelles ? Suivent-ils un pattern mnésique particulier ou similaire à celui observé avec les outils traditionnels d'évaluation de la mémoire, évaluant *l'apprentissage, la catégorisation, l'interférence proactive, les fausses reconnaissances, ou encore le bénéfice de la reconnaissance* comparé au rappel?
- 2) Quels sont les corrélats neuropsychologiques (en termes de ralentissement cognitif, fonctionnement exécutif, ou encore de mémoire épisodique) de ces différences liés à l'âge en mémoire quotidienne, si différence il y a ?
- 3) Sont-elles liées aux plaintes mnésiques subjectives des personnes âgées ?
- 4) Comment l'activité motrice induite par une navigation active interagit-elle avec la mémoire épisodique
- 5) Permet-elle de lever les effets de l'âge sur la mémoire quotidienne ?
- 6) Quels pourraient être les mécanismes neuropsychologiques sous-jacent à la navigation active ?

Plus spécifiquement, dans les *chapitres 5 et 6*, le HOMES-test sert de support aux expérimentations décrites. Il s'agit d'un test de mémoire épisodique fortement inspiré du CVLT, permettant l'étude des processus mnésiques à l'œuvre lors de la mémorisation d'objets familiers en situation de visite d'un appartement .

Les trois premières questions se rapportent aux études *1 et 2*, dans lesquelles nous nous attachons à démontrer un profil mnésique spécifique au vieillissement normal plus proche de celui du traumatisme crânien (*étude 1*) en utilisant l'approche de comparaison directe mais distinct de la DTA (*étude 2*). De ce fait les performances des jeunes, des âgés sains, et des patients (TC pour l'étude 1, et DTA pour l'étude 2) furent comparés sur des mesures de *rappel libre* (apprentissage, interférence proactive), de *catégorisation sémantique*, de *reconnaissance correcte*, ainsi que de *fausses reconnaissances* dérivées du HOMES test. Ces deux études étaient dirigées par l'hypothèse de déficit fronto-exécutif chez les âgés distinct du déficit médio-temporal/mnésique caractéristique de la DTA. Par conséquent, la relation de ces mesures du HOMES avec des mesures dérivées de tests de fonctionnement exécutif et

mnésique fut examinée. La relation entre la plainte mnésique et les mesures dérivées du HOMES test étaient également explorée.

L'*étude 3* testait l'hypothèse du bénéfice apporté par le contrôle moteur (manipulé sur forme de navigation active *versus* navigation passive dans l'appartement virtuel) sur ces processus mnésiques évalués par le HOMES tests (apprentissage, interférence proactive, catégorisation sémantique, la reconnaissance correcte, et les fausses reconnaissances). Nous nous attendions à reproduire un bénéfice de la navigation active apporté aux mesures dépendantes du traitement item-spécifique (apprentissage, reconnaissance correcte, fausses reconnaissances de source) comparé à la navigation passive, mais aucune différence entre les deux types de navigation sur les mesures dépendantes du traitement relationnel (i.e., catégorisation sémantique). Ainsi, nous espérons apporter une réponse à la question 4.

Finalement, dans l'*étude 4* notre objectif était de reproduire ce pattern spécifique aussi bien chez les jeunes que chez les âgés que d'investiguer les corrélats neuropsychologiques du bénéfice lié à la navigation active en termes de fonctionnement exécutif et mnésique. Cette dernière étude permettait ainsi de répondre aux questions 5 et 6.

## **II. Méthode**

Pour mener à bien nos objectifs, nous avons construit une méthodologie reposant pour l'essentiel sur l'utilisation de deux tests virtuels : le HOMES test.

### **1. Le HOMES-test**

Pour toutes les expérimentations, les participants ont reçu une évaluation neuropsychologique complète, dont le CVLT (Delis et al. 1987) et un ensemble de tests évaluant leurs capacités exécutives (détaillé dans chaque expérimentation). Ils ont également tous été évalués à l'aide du HOMES-test (pour *Human Object Memory from Everyday Scenes* décrit ci-après).

#### *1.1. Matériel*

Un processeur Dell® (3 GHz, 5 Gbytes in RAM) et une carte graphique NVidia® Quadro FX 4400 sont utilisés pour générer l'environnement virtuel projeté aux participants à l'aide du logiciel Virtools®.



Les expérimentations ont été effectuées dans une pièce sombre et calme permettant la projection à l'aide d'un vidéo projecteur F1+ de l'environnement sur un écran de 2m\*1.88 m placé à 2m des sujets assis confortablement en face de celui-ci.

L'environnement virtuel utilisé est une modélisation 3D d'un appartement virtuel présenté sous deux versions (A et B) créé grâce au logiciel Virtools ©. Chaque version est composée de 4 pièces (chambre, salle de bain, cuisine, salon, voire Figure 25) dans laquelle du mobilier et des objets sont visibles. Vingt items cibles sont communs aux deux versions (5 par catégorie) et 20 sont spécifiques à chaque appartement. Les normes d'association de Lieury et al. (1976) et les normes de fréquence de Alario & Ferrand (1999) ont été contrôlées pour être identiques dans les deux versions de l'appartement.



Figure 25. Captures d'écran de l'EV3D du HOMES-test, a) vues d'ensemble de l'appartement, b) points de vue lors de la visite de chaque pièce.

## *1.2. Procédure générale et mesures prélevées*

Les expérimentations ont été effectuées dans une pièce sombre et calme. Les participants sont installés confortablement en face de l'écran sur lequel l'EV3D est projeté.

Les participants visitent une première version de l'appartement (appelé version A) grâce à un balayage automatique de chaque pièce pendant 50 secondes suivant une courbe prédéfinie. Avant que la visualisation ne commence, l'expérimentateur donne les instructions suivantes : « Visualisez attentivement tout l'appartement parce que vous aurez à rappeler immédiatement après tout ce que vous aurez vu ».

De suite après la visite de l'appartement, une tâche de rappel libre est réalisée. Cette procédure (visite suivi d'un rappel libre) est reproduite une seconde fois.

Les participants visitent ensuite la seconde version de l'appartement (appelée version B), suivi d'un rappel libre immédiat. Les deux versions (A et B) sont contrebalancées entre les sujets.

Enfin, après un délai de 10min, une tâche de reconnaissance verbale (« Oui / Non », 40 éléments cibles et 16 distracteurs) est réalisée. Pour chaque item, les participants ont pour consigne de décider s'il a été présenté dans la version cible (A) de l'appartement. Lorsqu'un item non présent dans la version cible est reconnu comme une cible, une fausse reconnaissance est comptabilisée.

A partir de cette procédure inspirée du CVLT (Delis et al. 1987), plusieurs indices peuvent être extraits : le rappel libre, permettant de mesurer l'effet d'apprentissage au cours des essais successifs; l'interférence proactive ou effet délétère de la visite de l'appartement B sur le rappel des items contenus dans l'appartement A ; un indice de catégorisation (ARC-score ou LBC score) correspondant aux regroupements sémantiques effectués lors du rappel libre ; la différence reconnaissance/rappel libre ainsi que les fausses reconnaissances.

## Chapitre V

### *La mémoire quotidienne dans le vieillissement normal et dans les neuropathologies*

Dans le présent chapitre nous présentons 2 études expérimentales sous forme d'articles qui ont été acceptés ou soumis dans des journaux à comité de lecture (*peer-review*). La première concerne une comparaison « jeune vs. âgés vs. patients avec TC » (pour une synthèse de la littérature concernant les troubles de la mémoire associés au TC, voir annexe I, point 2) ; et la seconde une comparaison « jeune vs. âgés vs. patients avec MA » (pour une synthèse de la littérature concernant les troubles de la mémoire associés à la MA, voir annexe I, point 3).

**I. Everyday memory and its relationship to executive functioning in healthy older adults and in young patients with traumatic brain injury** (*La mémoire quotidienne et sa relation avec le fonctionnement exécutif chez des personnes âgées et des jeunes patients traumatisés crâniens*). **Accepté avec révisions dans** *Archives of Clinical Neuropsychology*.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

**Title:** Everyday-like memory and its cognitive correlates in healthy older adults and in young patients with traumatic brain injury : A study based on virtual HOMES test.

Accepté avec révisions dans *Archives of Clinical Neuropsychology*

Arvind Pala Prashant<sup>1</sup>; Bernard N’Kaoua<sup>1</sup>; Marie Déjos<sup>1</sup>; Jean-Michel Mazaux<sup>2</sup>; Florian Larrue<sup>3</sup>; Audrey Simion<sup>2</sup>; Sigrid Lozes<sup>2</sup>; Eugénie Scaglia<sup>4</sup>; Eric Sorita<sup>2</sup>; Hélène Sauzéon<sup>1,3</sup>.

Bernard N’Kaoua ; [bernard.nkaoua@u-bordeaux2.fr](mailto:bernard.nkaoua@u-bordeaux2.fr); tel : +33557575648

Marie Déjos ; [marie.dejos@u-bordeaux2.fr](mailto:marie.dejos@u-bordeaux2.fr); tel : +33632359970

Jean-Michel Mazaux ; [jean-michel@chu-bordeaux.fr](mailto:jean-michel@chu-bordeaux.fr); tel : + 33557820235

Florian Larrue ; [flo.larrue@gmail.com](mailto:flo.larrue@gmail.com); tel : +33663442150

Audrey Simion ; [audrey.simion@chu-bordeaux.fr](mailto:audrey.simion@chu-bordeaux.fr); tel : +33556795679

Sigrid Lozes ; [sigrid.lozes@chu-bordeaux.fr](mailto:sigrid.lozes@chu-bordeaux.fr); tel : +33556795679

Eugénie Scaglia ; [regema.asso@yahoo.fr](mailto:regema.asso@yahoo.fr); tel : +33325408083

Eric Sorita ; [eric.sorita@chu-bordeaux.fr](mailto:eric.sorita@chu-bordeaux.fr); tel : +33557574616

Hélène Sauzéon; [helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr](mailto:helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr); tel : +33620663177

<sup>1</sup> University of Bordeaux Segalen, Laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux, 146, rue Léo Saignat, Bât. 1B 1<sup>er</sup> étage, Zone Nord, 33000 Bordeaux cedex, France

<sup>2</sup> Physical medicine and Rehabilitation department, Pellegrin Hospital, Place Amélie Raba Léon, 33076 Bordeaux cedex, France

<sup>3</sup> INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), 200, rue Vieille Tour, 33400 Talence, France

<sup>4</sup> Réseau Gérontologie et Mémoire de l’Aube, 1 Av. Pierre Brossolette, 10000, Troyes

Correspondence should be addressed to Dr. Hélène Sauzéon, University of Bordeaux Segalen, Laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux, 146, rue Léo Saignat, Bât. 1B 1<sup>er</sup> étage, Zone Nord, 33000 Bordeaux cedex, France ; [helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr](mailto:helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr); tel : +33620663177.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

### **Abstract**

A direct comparison approach between normal aging and moderate-to-severe traumatic brain injury (TBI) was used to investigate everyday object memory patterns in both populations and to study their relationship with executive functioning, processing speed and episodic memory using a naturalistic environment created in a virtual reality program. Sixteen young controls, 15 healthy older adults and 15 TBI patients underwent the virtual HOMES test probing everyday-like memory processes (learning, proactive interference, semantic clustering, retrieval strategy and false recognitions) as well as tests of executive functioning, episodic memory, speed of processing and subjective memory complaint (SMC). Older adults and TBI patients exhibited similar patterns of HOMES based memory performances as follows: poor free recalls, high false recognitions, a greater benefit from recognition, but spared clustering performances and an intact proactive interference effect. The relation between HOMES measures and the SMC as well as the age-related differences in the HOMES measures were more mediated by executive functioning rather than by episodic memory functioning. By contrast, HOMES performances in the TBI group were correlated only with measures of episodic memory functioning. Results are discussed in terms of differential mediating effects of executive and episodic memory functioning for a similar pattern of memory performances in elderly and in TBI patients.

Keywords: aging, Traumatic Brain Injury, everyday memory, executive functioning, episodic memory, Subjective Memory Complaints

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

### **Introduction**

*Everyday memory* is the memory functioning embedded within daily activities (Magnussen & Heilstrup, 2007). The concept of “everyday memory” may encapsulate a variety of independent or related cognitive domains that function in a global and homogenous manner, such as keeping in mind that one has to buy some milk while driving back to home after work, and at the same time seeing a particular restaurant on the road that reminds him/her of a good friend he/she met there. This example shows an everyday situation in which memory functions are important (Davies & Thompson, 1988). The understanding of memory functioning in an everyday life setting is critical for diagnostic purposes or social reintegration, especially in the study of cognitive aging and neuropathologies such as traumatic brain injury (TBI).

One way to measure everyday memory is to assess Subjective Memory Complaints (SMCs) experienced by individuals in their daily life using self-rating scales (Flicker, Ferris, & Reisberg, 1993). SMCs are frequently prominent among elderly adults and patients suffering from neuropathologies such as TBI (Jamora, Young, & Ruff, 2012) and are generally considered as ecological valid measures of everyday memory (Calabria, Manenti, Rosini, Zanetti, Miniussi, & Cotteli, 2011; Ossher, Flegal, Lustig, 2013; Kinsella et al., 1996). Statistical relationships between actual memory performances and SMCs are critical for neuropsychological diagnosis or prognosis (Schmand, Jonker, Geerlings, & Lindeboom, 1997; Saykin et al., 2006). However, their relationship with objective memory performances

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

is not always found in either healthy older adults (Nilsson & Larsson, 2007) or TBI patients (Kinsella et al., 1996). According to the *veridicality* method (Franzen & Wilhelm, 1996), the relationship between actual performances and self-rating questionnaires is a support for the ecological validity of objective memory tests (i.e., the degree to which performances on a test reflect activities of daily life, Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003), and consequently, a failure to find a relationship reflects either a lack of ecological validity or subjective biases related to over- or underestimations of difficulties (Beaudoin & Desrichard, 2011; Sedikides & Gregg, 2008).

Very often, the relationship between actual and subjective memory performances are not found in elderly (for a review, see Hertzog, 2002) as well as in the TBI patients (e.g., Schiehser et al., 2011). Researchers in cognitive aging have related SMCs in elderly with affect changes or depression (e.g., Bolla, Lindgren, Bonaccorsy, & Bleecker, 1991; Gass & Apple, 1997), with personality factors (Pearman & Storandt, 2004; Reid & McLulich, 2006), with social stereotypes of “aging” (for a review, see Hertzog, 2002) or with age-related metacognitive and/or executive declines (Martins, Mares, & Stilwell, 2012; Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012). In severe TBI patients, executive impairments, lack of self-awareness as well as cognitive slowing are associated with low general cognitive complaints (Schiehser et al., 2011) but higher memory and learning complaints (Jamora et al., 2012; van Zomeren & van den Burg, 1985). Overall findings indicate that in healthy older adults as well as in TBI patients, the self-reported memory performance is contaminated by a set of variables inducing over- or underestimations compromising the use of *veridicality* method to establish the ecological validity of actual memory performances assessed by any test.

A better ecological validity free from subjective biases can be substantiated by another approach called *verisimilitude*, which is the extent to which characteristics of a test

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

are similar to real environments or to daily life activities (Franzen & Wilhelm, 1996, Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). Such approach is supported by studies showing that a higher degree of similarity with respect to daily life situations leads to stronger relationships with memory performances collected in real environments (Richardson, Montello, & Hegarty, 1999). As an illustration, studies using computer-based virtual reality simulations of realistic environments have successfully shown this relationship between VR-based measures and real life measures for healthy young adults (Wolbers & Hegarty, 2010), elderly people (Cushman, Stein, & Duffy, 2008) and in severe TBI (Sorita et al., 2012).

According to the principles of verisimilitude approach, the main purpose of this study was to use a VR-based memory test inspired by a real life situation in order to assess actual everyday-like memory difficulties in elderly people and in moderate-to-severe TBI patients.

The TBI patients are known to exhibit heterogeneous cognitive impairments covering the attention, the memory as well as the executive functioning (for review, Arciniegas, Held and Wagner, 2002). The shared executive defaults between healthy older adults and TBI patients have led researchers to directly compare the two populations, an approach developed by Stuss and colleagues (Levine, Stuss, & Milberg, 1997; Stuss, Craik, Sayer, Franchi, & Alexander, 1996) to test the fronto-executive hypothesis of age-related memory decline (Crawford, Bryan, Luszcz, Obonsawin, & Stewart, 2000; West, 1996). They showed similar behavioral performances between healthy older adults and patients with frontal lesions. This hypothesis has gained further support from studies showing similar memory-related activations in the prefrontal cortex in healthy older adults and moderate-to-severe TBI patients (Cabeza et al., 1997; Levine, Cabeza, McIntosh, Black, Grady, & Stuss, 2002). To our knowledge, only three studies have made direct comparisons between memory performances of healthy older adults and mild to severe TBI patients, showing poor



## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

performances to a similar extent in both populations in terms of poor recall and recognition (Kliegel, Eschen, Thöne-Otto, 2004; Vakil & Tweedy, 1994) or higher susceptibility to false recognitions (Ozen, Skinner, & Fernandes, 2010). Also, healthy older adults and moderate-to-severe TBI patients are known to exhibit poor performances compared to younger adults on various episodic memory processes assessed by traditional tests of verbal memory such as *diminished free recalls* despite a spared learning performance (Constantinidou & Baker, 2002; Haut & Shetty, 1992), *an abnormal or reduced proactive interference (PI)* (Ebert & Anderson, 2009; Hasher, Chung, May, & Foong, 2007), *a greater benefit from recognition compared to recall* (Brooks, 1974; Craik & McDowd, 1987), and a higher *susceptibility to false recognitions* (Craik, Morris, Morris, & Loewen, 1990; Dywan, Segalowitz, Henderson, & Jacoby, 1993). However, it is not clear if these processes are similarly affected in both populations. Such processes are known to be effortful and tapping strategic/executive functioning (Delis, Massman, Butters, Salmon, Cermak, & Kramer, 1991). Therefore, demonstrating behavioral similarities on such processes between healthy older adults and TBI patients may provide stronger evidence in favor of the executive deficit hypothesis. In contrast, a reduced speed of processing account has also been advanced as underlying age-related memory decline, (Salthouse, 1996) and fairly documented in severe TBI (Felmingham, Baghuley, & Green, 2004).

Statistical approaches using mediation analyses have challenged the two accounts in cognitive aging (fronto-executive hypothesis vs. reduced speed of processing hypothesis), but studies sometimes found better support for fronto-executive decline (e.g., Baudoin, Clarys, Vanneste, & Isingrini, 2009) while some others provided more support for the reduced speed of processing account (e.g., Lee et al., 2012). Additionally, other studies reported an equal mediating effect of executive functioning and speed of processing, notably for age-related

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

declines in episodic memory (Bugajska et al., 2007). To the best of our knowledge, such statistical approaches addressing mediating effects have neither been implemented for memory impairments in TBI nor for a memory performance comparison between healthy elderly persons and TBI patients. Consequently, this study was also motivated by the investigation of the neuropsychological underpinnings of memory performances in normal aging and TBI, testing both the executive deficit and the reduced processing speed hypotheses.

In accordance with this latter line of research, our first goal was to use the direct comparison approach combining young controls, healthy older adults and young traumatic brain-injured patients in order to investigate everyday-like memory performances on a finer analytical level, examining specific processes such as *learning*, *PI*, *semantic clustering*, *retrieval* and *false recognitions* using the HOMES test (Sauzéon et al., 2012). First, we expected similar everyday-like memory performance patterns between older adults and TBI patients on memory processes that are considered as tapping strategic/executive control. Second, we expected age-related differences in the HOMES measures as well as poor performances in TBI patients to be related to executive functioning and/or to reduced processing speed, but not with less resource-demanding episodic memory measures.

### **Method**

#### *Participants*

Forty-six subjects participated in this study: 16 young students (the control group) (age,  $M = 22.44$ ,  $SD = 2.05$ ; age range = 18.10-25.30), from the University of Bordeaux

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Victor Segalen, 15 healthy older adults (age,  $M = 66.53$ ;  $SD = 3.43$ ; age range = 61-73) and 15 young moderate-to-severe TBI patients (age,  $M = 36.27$ ,  $SD = 12.72$ ; age range = 20-56). Older adults were recruited through announcements at the Leisure Institute for Older Adults (OAREIL, Université du Temps Libre) and through flyers in community centers. Overall cognitive status was screened in older participants using the Mini-Mental State Examination (MMSE, Folstein, Folstein, & McHugh, 1975) and the Mattis Dementia Rating Scale (MDRS, Lucas et al., 1998) in order to rule out dementia. All healthy older adults had MMSE scores greater or equal than 28/30 ( $M = 29.47$ ;  $SD = .64$ , range = 28-30) and MDRS scores greater or equal to 132 ( $M = 138.20$ ;  $SD = 3.86$ , range = 132-144) according to established criteria (Green, Woodard, & Green, 1995; Lucas et al., 1998; Matteau et al., 2011). All of the healthy participants were screened for any pre-morbid history of neurological and/or psychiatric conditions, history of drug abuse and perceptual impairments (hearing or visual difficulties) and any serious medical problems that could impact cognition and memory. Patients were recruited through the physical medicine and rehabilitation unit of the Pellegrin Hospital.

All of the patients had closed head injury due to a blow to the head by external forces/external objects and/or indirect internal acceleration/deceleration movement of the brain and followed by a loss of consciousness as defined by Department of Defense and the Department of Veterans Affairs (Veterans Health Initiative, 2010). Most patients had diffuse axonal injuries, following vehicle crash accidents either as passengers ( $n = 7$ ), or drivers ( $n = 7$ ), or were pedestrian victims of collisions on public roads ( $n = 1$ ). All patients reported a distance from the initial trauma > 6 months with an average of 4.88 years ( $SD = 4.44$ ) years after the trauma with years ranging from .07 to 14.02 years. Patients were recruited if they met the following criteria: a) absence of pre-morbid medical conditions such as diabetes,

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

developmental cognitive impairments and learning deficits associated to Attention Deficit/Hyperactivity Disorder, drug addictions, prior neurological and/or psychiatric conditions; b) absence of speech disorders; and c) absence of anticholinergic medications at the time of the study, due to their potential association with mental status alteration (Campbell et al., 2009). Severity of TBI was based on the duration of loss of consciousness (LOC) reported in their medical file and on their Glasgow Coma Scale scores (GSC, Teasdale & Jennett, 1974) according to the classification system developed by the DOD/DVA . We therefore only included those patients with “moderate” (LOC was between 30 min and 24 hrs and  $9 \leq \text{GCS} \leq 12$ ) and “severe” injury (LOC was more than 24 hrs and at least  $3 \leq \text{GCS} \leq 8$ ). Twelve patients met these criteria for severe injury and 3 for moderate. All participants gave a written informed consent and the study has been approved by the ethical board of the University of Bordeaux Segalen.

Subjects were also screened for their New Technology (NT) experience (Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001) with computer use, computer games, and games involving VR. Each of these three items was rated from 0 to 7 (the maximum score was 21). Participants had to complete a French version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) which measured the severity of sickness induced by 3D simulators (e.g., virtual reality). This questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered into 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”. The weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy, Lane, Berbaum, and Lilienthal (1993). Significant differences were found with respect to age [ $F(2, 43) = 131.61, p < .0001, \eta_p^2 = .86$ ]. There was no significant differences on the SSQ level ( $p > .400$ ) and on the

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

education level ( $p > .100$ ). The difference between the groups with regards to NT experience was not significant ( $p > .100$ ). The demographic characteristics of the participants are presented in Table 1.

### *Neuropsychological testing*

*Executive functioning.* Participants were given the following neuropsychological tests as measuring executive functioning: the Trail Making Test A and B (Reitan, 1992) was administered and the corrected score [(Trail B – A/Trail A)] was computed as a measure of executive flexibility (Stuss, Bisschop, Alexander, Levine, Katz, & Izukawa, 2001). Stroop task (Stroop, 1935) was administered to all participants and the number of interference errors was taken as a measure of inhibition (Stuss, Floden, Alexander, Levine, & Katz, 2001; Vendrell, Junqué, Pujol, Jurado, Molet, & Grafman, 1995).

*Speed of processing.* The Digit Symbol Substitution Test (DSST, WAIS-revised, Wechsler, 1997) was administered as a measure of processing speed with the correct number of symbol substitutions in 1'30 mn (see Table 1).

*Subjective memory complaints.* The Memory self-evaluation questionnaire - short form (Clément et al., 2008) is a questionnaire assessing subjective memory complaints (SMCs) across three dimensions of everyday memory difficulties: QAM 1: overall everyday memory difficulty; QAM 2: memory difficulties related to everyday conversations; and QAM 3: those related to watching movies and reading books. Ratings are based on a Lickert scale from 1 [lowest rating, corresponding to “never”] to 6 [highest rating, corresponding to “always”] with a maximum score of 6 on the first dimension, 36 on the second and 24 on the third. The total QAM score were calculated by adding the sub-scores for each dimension.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

These tests along with the QAM were administered during the ten minutes delay of the HOMES procedure (see the material and procedure section).

*Episodic memory* was assessed using the California Verbal Learning Test (CVLT, Delis, Kramer, Kaplan, & Ober, 1987) administered beforehand and as a part of participant's global neuropsychological testing for another parallel study. The CVLT uses the multi-trial free recall list learning paradigm in which participants are presented with 5 consecutive study-test trials of a target shopping list (list A or Monday list) containing 16 words divided in 4 semantic categories. A second list (list B or Tuesday list) is immediately administered followed by one free recall. Eventually, a delayed yes/no item recognition task is administered, consisting of 16 targets and 28 distractors (see Delis et al., 1987, for a detailed description of the test). The sum of free recall trials 1 to 5 as a measure of learning and corrected recognition score (proportion of recognition hits – proportion of total false recognitions, Budson, Daffner, Desikan, & Schacter, 2000) were drawn from this test as measures of episodic memory.

### *Materials and procedure*

*The Virtual HOMES test.* The virtual environment was viewed using a F1+ overhead video projector on a 2 x 1.88 meter large screen fixed onto the wall. We used a Dell® processor (3 GHz, 5 Gbytes in RAM) and an NVidia® Quadro FX 4400 graphic card to generate a virtual apartment built using the Virtools® software. Participants sat 2 meters away from the display screen in a dark, silent room to visualize the VE projected in front of them. Each participant visualized two versions (versions A and B) of a virtual apartment consisting of 40 objects: 20 objects that were specific to each version (see Fig. 1, for a bird's eye view

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

of the apartment) and 20 objects common to both versions. There were four categories [a bedroom, bathroom, kitchen (Fig. 1), and sitting-room], therefore each category contained 10 of these objects, 5 specific and 5 common to both versions (e.g., the bedroom contained a *pant* on the *bed*, *pillows* and a *bedside table*, a *wardrobe*...in the version A but a *robe* was seen instead on the same bed in the version B). Objects were expected to be in their corresponding rooms. Objects in the two versions have been selected to be equivalent in terms of the association norms as given by Lieury, Iff, and Duris (1976) and the object frequency norms (Alario & Ferrand, 1999).

The procedure was similar to the one described by Sauzéon et al. (2012). Participants watched each room of each version of the apartment during 50 seconds; since there were 4 rooms (corresponding to the 4 categories), the total amount of time spent watching each version lasted 200 seconds. Participants first watched a target version of the apartment (called version A) which was presented twice (trial 1 and 2) and each participant had a free recall task immediately after each presentation. Before each trial started, the experimenter gave the following instruction to the participants: “Carefully watch everything in the apartment because you will have to immediately recall all the objects that you previously saw”. Immediately after the last recall task, participants visualized the other version of the apartment (version B) followed by only one immediate free recall task. The instructions were same as for the target version. The presentation of the two versions was counterbalanced across participants (i.e., half of the participants watched one version first as the target version, half watched the other version first). After the recall of version B, within a delay of about 10 minutes subjects had to complete tests of executive functions, speed of processing and the QAM described in the previous section. After that delay, a final yes/no recognition task was then administered to all participants. Since both versions of the apartment were

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

counterbalanced across participants, two lists containing 56 words each were constructed accordingly: the first list corresponding to one version as the target apartment and the second list to the other version as the target apartment. In both lists, 40 target items and 16 foils were presented in a pseudo-random order. Among the targets, 20 items were specific to the target version (version A) and 20 were common to both versions (i.e., studied during both version A and B visualization, and thus held constant across lists). Among the foils, 8 items were specific to version B and were considered as source lures; the 8 remaining items were unstudied items considered as gist lures (they were not presented during the encoding phase but were categorically-related to the target items and had similar constructions in terms of associative norms criteria). For each item, participants decided whether it had been presented in the target version of the apartment (“yes”) or not (“no”). Thus, if a source lure was recognized as a target, the subject made a source-based FR; if a gist lure (semantically related lure) was recognized as a target, the participant made a gist-based FR.

### *Scoring*

Learning was measured as the proportion of correct free recalls for each learning trials of the target apartment (version A). Correct free recall was calculated by giving 1 point each time a subject recalled a correct item and was calculated as the mean proportion of objects correctly recalled. Since there was 40 target items (20 viewed only in the target version and 20 shared by both the target version and the version B), the maximum correct recall score was 40. Encoding strategy was measured as the increased proportion of semantic clustering of items from trial to trial. Semantic clustering was scored using the new LBC (List-Based Clustering) measure (Stricker et al., 2002). The LBC calculates an expected cluster value, the number of clusters expected by chance (EXP), based on the number of objects recalled ( $r$ ),



## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

the number of objects in a category ( $m$ ), and the total number of objects studied ( $N_L$ ):  $EXP = [(r-1)*(m-1)]/(N_L-1)$ . The LBC score is calculated by subtracting the expected value given in the above equation from the observed number of clusters [ $LBC = OBS - EXP$ ]. The observed semantic clustering (OBS) was calculated by giving 1 point each time two objects belonging to the same category (room) were recalled consecutively (e.g., a participant recalls a *sofa*, then a *carpet*). Hence, the maximum score for the VR-based semantic clustering is 27 ( $r = 40$ ; observed clusters = 36) and the minimum score is -9 ( $r = 40$ ; observed = 0). PI was assessed as the discrepancy between free recall performances for list A and list B (free recall list A trial 1 vs. free recall list B). Recognition hits were measured as the proportion of correctly recognized target items. Finally, false recognitions were measured as the proportion of false alarms during the recognition task, separately for source-based lures and gist-based lures. Additionally, a recognition accuracy score corrected for response bias was also computed by subtracting proportions of total false recognitions from proportions of recognition hits (hits - total false recognitions, Budson et al., 2000).

## Results

### *Neuropsychological performances*

The performances of the groups on the neuropsychological tests were compared using a one-way ANOVA. Post-hoc comparisons were carried out using Fisher's procedure with alpha set at .05 (see Table 1.). Effect sizes were estimated using the partial eta squared ( $\eta^2$ ) with the following formula:  $\eta^2 = SS \text{ effect} / (SS \text{ effect} + SS \text{ error})$ .

*Executive functioning.* There was a significant group difference on the Trail Making Test,  $F(2, 43) = 24.10$ ,  $p < .0001$ ,  $MSE = 1.02$ ,  $\eta^2 = .53$ . Post-hoc comparisons revealed a

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

significant difference between older adults and young controls, with older adults performing less well compared with younger adults ( $p < .0001$ ). A significant difference was also observed between patients and young controls, with patients performing less well than younger adults ( $p < .0001$ ). There was no significant difference between patients and older adults ( $p > .200$ ). Finally, a significant effect of group was found on the Stroop errors,  $F(2, 43) = 9.73$ ,  $p < .001$ ,  $MSE = 5.57$ ,  $\eta^2 = .31$ , with differences revealed by post-hoc comparisons between the older and the younger controls ( $p < .05$ ), in favor of the control group, between older adults and TBI patients ( $p < .05$ ), with better performances by older adults, and finally between the younger group and the TBI patient group ( $p < .0001$ ), with higher interference errors committed by TBI patients.

*Speed of processing.* A significant group difference was noted on the DSST,  $F(2, 43) = 31.34$ ,  $MSE = 126.89$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2 = .59$ . Post-hoc comparisons revealed that older adults performed worse than young adults ( $p < .0001$ ) and that the TBI patients' scores were lower compared with those of the young controls ( $p < .0001$ ) and the older adults ( $p < .05$ ).

*Subjective memory complaints.* There was a significant group difference on the SMCs scores using the QAM total score,  $F(2, 43) = 21.68$ ,  $p < .0001$ ,  $MSE = 53.20$ ,  $\eta^2 = .50$ . Post-hoc comparisons between groups revealed that older adults had more complaints than young controls ( $p < .05$ ) but fewer than TBI patients ( $p < .001$ ); also, TBI patients had more complaints than young controls ( $p < .0001$ ).

*Verbal episodic memory.* A significant group difference emerged on the CVLT total free recall 1 to 5 measure,  $F(2, 43) = 19.84$ ,  $MSE = 113.21$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2 = .48$ . Younger adults made more correct recalls across trials compared to older adults ( $p < .01$ ), who in turn had better overall recall performances than TBI patients ( $p < .01$ ), younger control also had better performances compared to patients ( $p < .0001$ ), as shown in Table 1. A significant

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

difference was also observed on the corrected recognition (hit-false recognitions) score,  $F(2, 43) = 8.05$ ,  $MSE = 0.41$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .27$ . Post-hoc tests revealed higher recognition accuracy in younger adults compared with older adults ( $p < .05$ ) and TBI patients ( $p < .0001$ ). However, the difference between older adults and TBI patients did not reach significance ( $p > .05$ ).

(Insert Table 1)

### *Performances on the HOMES test*

Mixed-design ANOVAs were carried out with group (young controls, healthy older adults and young TBI patients) as the between-subject variable and each of the following HOMES indices as within-subject variables: learning (trials: trial 1 vs. trial 2), PI (versions: version A free recall trial 1 vs. free recall version B), semantic clustering (trial 1 vs. trial 2), retrieval strategy (type of task: version A free recall trial 2 vs. recognition hits), and false recognitions (type of lures: source-based vs. gist-based). An additional one way ANOVA comparing the three groups on the corrected recognition score was carried out. Data are presented in Table 2.

As pointed out by one reviewer, more variance in the SSQ performances of the TBI group was observed, leading us to consider the SSQ as a covariable in the analyses of the HOMES performances using mixed ANCOVAs with group as the between-subject variable and each of the HOMES in processes as within-subject factor. These ANCOVAs did not yield any significant effect relative to the SSQ variable ( $p > .100$ ). Similarly, potential sex differences have been assessed using a 2 (male, female) X 3 (groups: younger, older, TBI) X 2 (each of the within-subject factor previously mentioned) mixed ANOVAs for each HOMES

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

measures. Any simple or interaction effect including sex factor did not reach significance. We therefore, only presented the initial 3 (group) X 2 (each of the within-subject factors) mixed ANOVAs.

*HOMES learning.* The 2 (learning: free recall of version A: trial 1 vs. trial 2) X 3 (groups: young controls, older adults, young TBI patients) mixed ANOVA with proportions of correct free recall as the dependent variable revealed a main effect of learning,  $F(1,43) = 38.97$ ,  $MSE = 15.01$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .47$ ; and a main effect of group,  $F(2, 43) = 29.64$ ,  $MSE = 43.85$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .58$ . The interaction was not significant,  $F(2,43) = 1.69$ ,  $MSE = 15.01$ . Overall, recall performances increased from trial 1 to trial 2. A post-hoc comparison revealed significant group differences between young controls and older adults ( $p < .01$ ), between young controls and TBI patients ( $p < .0001$ ), with higher recall performances in controls compared with older adults and with TBI patients, but not between older adults and patients ( $p > .05$ ).

*HOMES Proactive Interference.* The 2 (free recall trials: version A trial 1 vs. version B) X 3(group) ANOVA with the proportions of correct free recall showed a significant main effect of trials,  $F(1,43) = 4.12$ ,  $p < .05$ ,  $MSE = 0.01$ ,  $\eta_p^2 = .09$ ; and group,  $F(2,43) = 18.07$ ,  $p < .0001$ ,  $MSE = 0.04$ ,  $\eta_p^2 = .46$ . The interference effect was revealed by diminished recall on trial 1 version B compared to trial 1 version A. Post-hoc comparisons showed a significant difference between healthy young controls and older adults ( $p < .0001$ ) and young controls and TBI patients ( $p < .0001$ ): overall better recall performances were observed in controls compared with older adults and TBI patients. Older adults and TBI patients had similar absolute performances ( $p > .100$ ). There was no significant interaction,  $F(2,43) = 1.34$ ,  $MSE = 0.01$ .

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

*HOMES semantic clustering.* The 2 (version A trials: trial 1 vs. trial 2) X 3 (groups) ANOVA with the LBC scores as the dependent variable only revealed a main effect of trials,  $F(1,43) = 34.78$ ,  $MSE = 21.06$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .45$ . Across groups, semantic clustering increased from trial 1 to trial 2. There was no main effect of group,  $F(2,43) = 2.72$ ,  $MSE = 77.39$ ; or any interaction,  $F(2,43) = 0.74$ ,  $MSE = 21.06$ .

*HOMES retrieval strategy.* The 2 (retrieval tasks: free recall vs. recognition hits) X 3 (groups) ANOVA with the proportions of correct performances yielded a main effect of tasks,  $F(1,43) = 35.14$ ,  $MSE = 13.36$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .45$ ; and a main effect of group,  $F(2,43) = 12.62$ ,  $MSE = 36.31$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .37$ . Overall, performances were better on the recognition task compared to the free recall task. Post-hoc comparisons showed that older adults ( $p < .001$ ) and TBI patients ( $p < .0001$ ) both performed less well compared with young controls. Also, healthy older adults and TBI patients had equally poor performances ( $p > .200$ ). Furthermore, there was a significant interaction,  $F(2,43) = 9.22$ ,  $MSE = 13.36$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .30$ , showing that the difference between performances on the recall and recognition tasks increased from young control to older adults and to TBI patients.

*HOMES false recognitions.* The 2 (type of lures: source-based vs. gist-based) X 3 (groups) ANOVA yielded a main effect of the type of lures,  $F(1,43) = 19.94$ ,  $MSE = 1.31$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .32$ ; a main effect of group,  $F(2,43) = 6.33$ ,  $MSE = 2.05$ ,  $p < .01$ ,  $\eta_p^2 = .23$ ; but no significant interaction,  $F(2,43) = 0.71$ ,  $MSE = 1.31$ . Overall, source-based lures were endorsed more often than gist-based lures. Post-hoc comparisons revealed that the difference between young controls and older adults was significant ( $p < .01$ ) as was the difference between young controls and TBI patients ( $p < .01$ ), with a higher susceptibility to false recognitions in older adults and TBI compared with young controls. Overall, older adults and

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

TBI patients were equally susceptible to false recognitions irrespective of the type of lure ( $p > .800$ ).

*Corrected recognition performances.* The one-way ANOVA with hits minus false recognition as the dependent variable revealed a significant group effect,  $F(2, 43) = 10.11$ ,  $MSE = .02$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .32$ , showing higher recognition accuracy in younger adults compared to older adults ( $p < .0001$ ) and to TBI patients ( $p < .0001$ ). Recognition accuracy in older adults and TBI patients were not significantly different ( $p > .09$ )

(Insert Table 2 about here)

### *Correlational and mediation analyses*

Two separate sets of correlations were conducted: The first set used Pearson's product-moment correlations between age, HOMES indices, neuropsychological measures of executive functioning (EF), episodic memory (EM), speed of processing (SP) and SMCs. Following the method recommended by Bryan and Luszcz (1996), age was coded as a dichotomous variable (younger participants = 0, older participants = 1) given that such variables in a between-group design are bimodally distributed and tend to inflate correlations because the range of scores is overestimated. A *HOMES learning* measure was calculated as the sum of recall trials 1 and 2, a *HOMES false recognitions* measure were calculated as the sum of source-based and gist-based false alarms. We also took the *HOMES recognition hits* and *corrected recognition measure (hits-false recognitions)*. Furthermore, since all executive functioning tests were correlated with each other with the total sample (the TMT score and the Stroop errors,  $r = .46$ ,  $p < .001$ ), this allowed us to calculate a composite score of executive functioning (EF). To that purpose, scores on each executive functioning test were

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

transformed into *z*-scores and averaged. Similarly, we calculated a *CVLT corrected recognition* measure (the proportions of total source-based and gist-based false recognitions subtracted from the proportions of recognition hits). We also converted the CVLT free recall trials 5 into *z*-score. These two measures were correlated when the total sample was taken, ( $r = .67, p < .0001$ ). These two memory measures were summed and then averaged to calculate a composite score of episodic memory (EM), as they tend to be less associated with fluid intelligence or reasoning but more with episodic memory measures (Kramer et al., 2005; Krueger & Salthouse, 2011). Hence, we were able to carry out partial correlations of age with HOMES indices and with SMCs controlling respectively for EF, SP and EM. The second set examined Pearson's correlations between these HOMES measures, EF, EM, SP and SMCs, separately in the TBI group. Significance was set at  $p < .01$  to correct for multiple correlations in both sets.

*Correlations with age.* Regarding the first set, age was significantly and negatively correlated with the HOMES learning ( $r = -.78, p < .0001$ ) and the HOMES corrected recognitions ( $r = -.65, p < .0001$ ), and positively with the HOMES false recognition ( $r = .48, p < .01$ ). Age was also positively correlated with EF ( $r = .82, p < .0001$ ), reflecting the increase of interference errors on the Stroop task and a greater time to complete the TMT task but negatively associated with EM ( $r = -.55, p < .001$ ) and SP ( $r = -.82, p < .0001$ ). Furthermore, subjective memory complaints as assessed by the QAM were correlated both with age ( $r = .65, p < .0001$ ) and the HOMES learning ( $r = -.55, p < .0001$ ) but not with EM ( $p > .500$ ). We observed only a trend toward significance for the correlation between the QAM and corrected recognitions ( $r = -.37, p = .04$ ) since it did not reach the level of significance fixed to correct for multiple correlations. Finally all of the neuropsychological indices were correlated with the HOMES learning and the HOMES corrected recognition. But EF was additionally

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

correlated with the HOMES false recognitions ( $r = .46, p < .01$ ). These correlations are presented in the upper part of the table 3.

*Partial correlations controlling for EF.* When the correlation of age with HOMES learning were controlled for EF, the correlation diminished and was not significant anymore ( $r = -.35, p > .05$ ). Similarly, the correlation between age and HOMES false recognitions was not significant anymore ( $r = .21, p > .200$ ) after EF had been partialled out. Similarly the correlation between age and QAM was not significant anymore after controlling for EF ( $r = .26, p > .100$ ). The only correlation that diminished but still remained significant was the one between age and the HOMES corrected recognition ( $r = -.44, p < .05$ ).

*Partial correlations controlling for SP* did not significantly diminished correlations of age with either HOMES indices or QAM performances.

*Controlling for EM* did not diminish the correlation of age with HOMES learning, HOMES corrected recognition and with QAM but they still remained significant as seen in Table 3. The only correlation to diminish beyond the level of significance was the one between age and the HOMES false recognition ( $r = .32, p > .05$ ). Partial correlations are presented in the bottom part of Table 3.

Finally, controlling for EF resulted in a no longer significant correlation between QAM and the HOMES learning ( $r = -.04, p > .800$ ). Partialling out SP and EM did slightly diminish the correlation between QAM and the HOMES learning but it still remained significant.

When examining correlations in the TBI group, we found that the HOMES learning ( $r = .66, p < .01$ ), and the HOMES recognition hits ( $r = .73, p < .01$ ) were positively and significantly correlated with EM. The correlation between the HOMES corrected recognition and EM showed a tendency toward significance since it did not reach the level of  $p < .01$  ( $r =$



## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

.64,  $p < .05$ ). Furthermore, we did not obtain any significant correlations between the total QAM and the HOMES measures.

To ensure that the performances of patients were not due to their severity, since the present study included moderate to severe TBI patients, we also performed secondary correlational analyses of the above mentioned HOMES indices with measures of TBI severity (the length of loss of consciousness and the GCS score). None of the HOMES measures significantly correlated with these measures of severity.

(Insert table 3 and 4 about here)

### **Discussion**

The goal of the present study was to a) investigate everyday-like memory patterns in healthy older adults and TBI patients using a realistic VR-based memory test and b) examine their relationship with executive functioning, speed of processing, episodic memory and SMCs. More specifically, these relationships were separately examined for the group comprised of younger adults and healthy older adults to examine neuropsychological underpinnings of age-related differences in the HOMES memory processes. A separate correlational analysis was performed in the TBI group between the HOMES measures, the neuropsychological measures and SMCs.

Regarding the first goal, we showed the typical age-related effects observed using traditional memory tests (e.g., Paolo, Tröster, & Ryan, 1997) or laboratory assessments, as follows: a reduced free recall, a greater benefit from recognition compared to free recall, poorer recognition accuracy, and a higher susceptibility to false recognitions in older adults compared to younger adults, but a spared semantic clustering ( Craik & McDowd, 1987;

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Constantinidou & Baker, 2002; Ebert & Anderson, 2009; Pierce et al., 2005). More interestingly, using the direct comparison approach (Stuss et al., 1997), we found a strikingly similar everyday-like memory pattern in moderate-to-severe TBI patients who had equally poor performances on the HOMES test. In the Ozen et al. (2010) study, the patient sample consisted of severe, mild and moderate TBI. Our results suggest that the similarity still prevails with moderate and mostly severe TBI, regardless of the test format (verbal memory tests vs. VR-based memory assessment) (Vakil & Tweedy, 1994; Kliegel et al., 2004; Ozen et al., 2010). Taken together, these results are consistent with fronto-executive account according to which memory processes tapping controlled/effortful processes, such those involved in free recall test or those involved in the rejection of false alarms, are sensitive to cognitive aging (e.g., Craik & McDowd, 1987 ; Plancher, Guyard, Nicolas, & Piolino, 2009; for review, Braver & West, 2008) or to TBI (DeLuca, Schultheis, Madigan, Christodoulou, & Averill, 2000; Brooks, Weaver, & Scialfa, 2006; for review, Vakil, 2005).

This assumption was further investigated by addressing the mediating effects of executive functioning (EF), speed processing (SP) and episodic memory (EM) functioning.

When analyzing the mediating effect of EF, SP and EM on age-related differences in these HOMES measures, we found that executive functioning alone mediated the age effects in learning and false recognitions but it did not mediate the age differences in corrected recognition. These results are in line with previous findings that show a single mediation of executive functioning in age differences in free recall of a verbal material (Troyer et al., 1994), extending them to everyday memory in more naturalistic situations. To our knowledge, cognitive correlates of false recognitions have not been examined yet using mediation analyses but correlations between false recognitions and executive functioning were found in normal aging (Plancher et al., 2009), and higher false recognition were also

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

observed in patients with frontal lesions (Baldo, Delis, Kramer, & Shimamura, 2002). However, compared to the HOMES learning, we did not obtain a complete EF/EM dissociation since EM made a little but significant contribution to false recognitions, thus only partially confirming the fronto-executive account. Note that several aging studies stated that the high susceptibility to false recognition with age originates from declines in both executive and episodic memory functioning (for a review, see Gallo, 2006). Finally, processing speed as measured by the DSST did not contribute at all to any of the HOMES measures, thus supporting the executive deficit hypothesis (Crawford et al., 2000; Troyer et al., 1994) rather than the reduced speed of processing (Lee et al., 2012). Overall, these results are consistent with views of age-related memory decline as a deficit in effortful recollection processes but intact automatic familiarity, leading to a preserved semantic clustering and a higher susceptibility to false recognitions (Pierce et al., 2005). A small contribution of executive functioning to age-related differences in recognition accuracy suggests that other cognitive functions perhaps contribute more substantially to them such as visuospatial abilities or other executive functions not assessed in the present study.

The separate examination of correlations in TBI patients showed that most of the HOMES measures (learning and recognition hits) were correlated only with the episodic memory measure but not with other neuropsychological composite scores. We expected these measures along with the HOMES false recognitions to be associated with executive functioning and/or processing speed given similar performances in both older adults and TBI patients but not-or to a lesser extent-with memory. As surprising as it seems, previous studies have already shown for instance that false recognitions in aging is associated with executive functioning (Dywan, Segalowitz, & Williamson, 1994) while a similar procedure shows a stronger relationship of source memory errors with other cognitive abilities (e.g., face

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

discrimination) than executive functions in TBI patients (Dywan, Segalowitz, Henderson, & Jacoby, 1993). A closer look at the table 4 also shows numerically moderate correlations between these HOMES measures and processing speed that did not reach significance, suggesting perhaps a low power due to a small sample size. The present findings suggest that similar everyday performances in these two populations known for declining executive functioning and episodic memory may in fact involve different neuropsychological correlates. Henceforth, finding different underlying cognitive mechanisms in TBI patients only partly satisfies the executive deficit hypothesis of age-related memory decline in normal aging.

Our behavioral results on the HOMES everyday-like memory assessment are also mirroring correlational results regarding older adults' SMCs (for a review, see Nilsson & Larsson, 2007): complaints on the QAM were not correlated to actual everyday-like memory performance, except for the HOMES learning measure. This later exception can be seen as a support to the verisimilitude approach as proposed by some authors (Plancher et al., 2010; Schmitter-Edgecombe & Seelye, 2012).

Similarly, higher SMCs in TBI patients were not correlated with any of the HOMES measures. Higher SMCs in severe TBI patients were also reported in another recent study (Jamora et al., 2012) and seem counterintuitive to the fact that a lack of awareness may results in an over-estimation of memory performances (e.g., Schiehser et al., 2011). However, the presence/absence of awareness of memory functioning in everyday life in TBI patients is still under debate (e.g., Anderson & Schmitter-Edgecombe, 2009) and metacognitive deficits in TBI patients may as well be task-dependent (Chiou, Carlson, Arnett, Cosentino, & Hillary, 2011). Hence, the absence of correlation between SMCs and any of the HOMES or other neuropsychological measures in the present study may be explained by several potential

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

factors: a total lack of awareness (Anderson & Tranel, 1989), task difficulty (Chiou, & Hillary, 2012), or even a lack of power due to a small sample size.

Three limitations of this study are noteworthy. First, we only used a limited number of tests (two) to assess executive functioning and only two executive abilities (cognitive flexibility and inhibition). It is not known if mediation effects would be stronger or weaker with a battery of tests assessing a wider range of executive functions (i.e., planning, shifting, updating...). Second, we only used one self-report questionnaire (the QAM). It would be interesting to demonstrate ecological validity by showing relationships of various questionnaires assessing everyday memory difficulties with actual everyday memory performances on the VR-based HOMES tests, thus combining veridicality and verisimilitude approaches. But a stronger experimental demonstration of ecological validity of the HOMES test would certainly reside in showing the transfer of performances from the HOMES test to a real-large scale apartment containing real everyday objects. Finally, overall we had small sample sizes, thus exposing our study to insufficient power. Therefore, further studies need to replicate this procedure with increased sample sizes.

In summary, we showed similar everyday memory performances in healthy older adults and young moderate-to-severe TBI patients on several of the HOMES measures (learning, recognition memory, and false recognitions). However, despite similar behavioral performances, different cognitive mediators were found in normal aging and TBI: Mediating effects of executive functioning were observed for age differences while episodic memory influences were observed for TBI patients. Hence, the present study highlights the need of more cautious interpretations of cognitive mechanisms behind similar behavioral patterns in different populations, especially in clinical settings. This study also highlights the use of verisimilitude to substantiate some evidence of ecological validity through VR-based

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

assessments. However, future research using VR-based everyday memory to study its change with aging or TBI should include a wider range of neuropsychological tests in order to well appreciate which cognitive mediators play a major role in cognitively multi-determined memory performances.

### References

- Alario, F.-X., & Ferrand, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for French: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *31*, 531–552.
- Anderson, J.W., & Schmitter-Edgecombe, M. (2009). Predictions of episodic memory following moderate to severe traumatic brain injury during inpatient rehabilitation. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31* (4), 425-438.
- Arciniegas, D.B., Held, K., & Wagner, P. (2002). Cognitive impairment following Traumatic Brain Injury. *Current treatment Options in Neurology*, *4* (1), 43-57.
- Baldo, J.V., Delis, D., Kramer, J., & Shimamura, A.P. (2002). Memory performance on the California Verbal Learning Test-II: findings from patients with focal frontal lesions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *8* (4), 539-546.
- Baudoin, A., Clarys, D., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2009). Executive functioning and processing speed in age-related differences in memory: contribution of a coding task. *Brain & Cognition*, *71* (3), 240-245.
- Beaudoin, M. & Desrichard, O. (2011). Are memory self-efficacy and memory performance related? A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *137*, 211-241
- Bolla, K.I., Lindgren, K.N., Binaccorsy, C., & Bleeker, M.L. (1991). Memory complaints in older adults: fact or fiction? *JAMA Neurology*, *48* (1), 61-64.
- Braver, T.S., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F.I.M. Craik & T.A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (311-372). Hove: Psychology Press.
- Brooks, D.N. (1974). Recognition memory and head Injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *37*, 794-801.
- Brooks, B.L., Weaver, L.E., & Scialfa, C.T. (2006). Does impaired executive functioning differentially impact verbal memory measures in older adults with suspected dementia? *The Clinical Neuropsychologist*, *20*, 230-242.
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free recall performance. *Psychology and Aging*, *11*, 3–9.
- Budson, A.E., Daffner, K.R., Desikan, R., & Schacter, D.L. (2000). When false recognition is unopposed by true recognition: gist-based memory distortion in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, *14* (2), 277-287.
- Bugajska, A., Clarys D., Jarry, C., Tacconat, L., Tapia, G., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2007) The effect of aging in recollective experience: the processing speed and executive functioning hypothesis. *Consciousness and Cognition*, *16* (4), 797-808.
- Cabeza, R., Grady, C.L., Nyberg, L., McIntosh, A.R., Tulving, E., Kapur, S., ..., & Craik, F.I.M. (1997). Age-related differences in neural activity during memory encoding and retrieval: A Positron Emission Tomography study. *Journal of Neuroscience*, *17* (1), 391-400.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

- Calabria, M., Manenti, R., Rosini, S., Zanetti, O., Miniussi, C., & Cotelli, M. (2011). Objective and subjective memory impairment in elderly adults : a revised version of the Everyday Memory Questionnaire. *Aging Clinical and Experimental Research*, 23, 67-73.
- Campbell, N., Boustani, M., Limbil, T., Ott, H., Fox, C., Maidment, I., ..., & Gulati, R. (2009). The cognitive impact of anticholinergics: a clinical review. *Clinical Interventions in Aging*, 4, 225–233.
- Chaytor, N. & Schmitter-Edgecombe, M. (2003). The ecological validity of neuropsychological testing: A review of the literature on everyday cognitive skills. *Neuropsychological Review*, 13 (4), 181-197.
- Chiou, K.S., & Hillary, F.G. (2012). Benefits or order: the influence of item sequencing on metacognition in moderate and severe traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 18, 379-383.
- Clément, F., Belleville, S., & Gauthier, S. (2008). Cognitive complaint in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 14 (2), 222-232
- Constantinidou, F., & Baker, S. (2002). Stimulus modality and verbal learning performance in normal aging. *Brain and Language*, 82, 296-311.
- Craik, F.I.M., & McDowd, J.M. (1987). Age differences in recall and recognition. *Journal Of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 13, 473-479.
- Craik, F.I.M., Morris, L.W., Morris, R.G., & Loewen, E.R. (1990). Relations between source amnesia and frontal lobe functioning in older adults. *Psychology and Aging*, 5 (1), 148-151.
- Crawford, J.R., Bryan, J., Luszcz, M.A., Obonsawin, M.C., & Stewart, L. (2000). The executive decline hypothesis of cognitive aging: do executive deficits qualify as differential deficits and do they mediate age-related memory decline? *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7(1), 9-31.
- Cushman, L.A., Stein, K., & Duffy, C.J. (2008). Detecting navigational deficits in aging and Alzheimer's disease using virtual reality. *Neurology*, 71 (12), 888-895.
- Davies, G.M. (Ed.) & Thompson, D.M. (Ed). (1988). *Memory in context: context in memory*. John Wiley & Sons: Oxford, England.
- Delis, D.C., Massman, P.J., Butters, N., Salmon, D., Cermak, L. S., & Kramer, J.H. (1991). Profiles of demented and Amnesic Patients on the California Verbal Learning Test: Implication for the assessment of memory disorders. *Psychological Assessment*, 3 (1), 19-26.
- Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., & Ober, B.A. (1987). *California Verbal Learning Verbal Test: adult version manual*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- DeLuca, J., Schultheis, M.T., Madigan, N.K., Christodoulou, C., & Averill, A. (2000). Acquisition versus retrieval deficits in traumatic brain injury: implications for memory rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81 (10), 1327-1333.
- Dywan, J., Segalowitz, S.J., Henderson, D., & Jacoby, L. (1993). Memory for source after traumatic brain injury. *Brain and Cognition*, 21, 20-43.
- Dywan, J., Segalowitz, S.J., & Williamson, L. (1994). Source monitoring during name recognition in older adults: psychometric and electrophysiological correlates. *Psychology and Aging*, 9 (4), 568-577.
- Ebert, P.L., & Anderson, N.D. (2009). Memory interference in young adults, healthy older adults, and older adults with amnesic Mild Cognitive Impairment. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 15(1), 83-93.
- Felmingham, K.L., Baguley, I.J., & Green, A.M. (2004). Effects of diffuse axonal injury on speed of information processing following severe traumatic brain injury. *Neuropsychology*, 18 (3), 564-571.
- Flicker, C., Ferris, S.H., & Reisberg, B. (1993). A longitudinal study of cognitive function in elderly persons with subjective memory complaints. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 41 (10), 1029-1032.
- Folstein , M.F. , Folstein , S.E. , & McHugh , P.R . ( 1975). “Mini-Mental State”: A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician . *Journal of Psychiatric Research*, 12 , 189 – 198.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

- Franzen, M.D., & Wilhelm, K.L. (1996). Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In Sbordone, R.J., and Long, C.J. (Eds.) *Ecological validity of neuropsychological testing*. (pp. 91-112). Delray Beach, FL, England: Gr Press/St Lucie Press, Inc.
- Gass, C.S., & Apple, C. (1997). Cognitive complaints in closed head injury: relationship to memory test performance and emotional disturbance. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 19 (2), 290-299.
- Gallo, D.A. (2006). *Associative illusions of memory: research on false memory for related events*. New York: Psychology Press.
- Green, R.C., Woodard, J.L., & Green, J. (1995). Validity of the Mattis Dementia Rating Scale for detection of cognitive impairment in elderly. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 7 (3), 357-360.
- Hasher, L., Chung, C., May, C. P., & Foong, N. (2002). Age, time of testing, and proactive interference. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56, 200-207.
- Haut, M., & Shuttly, M.S. (1992). Patterns of verbal learning after closed head injury. *Neuropsychology*, 6, 51-58.
- Hertzog, C. (2002). Metacognition in older adults: Implications for application. In T. J. Perfect & B. L. Schwartz (Eds.). *Applied meta-cognition* (pp. 169-196). New York, NY: Cambridge University Press.
- Jamora, C.W., Young, A., & Ruff, F.M. (2012). Comparison of subjective memory complaints with neuropsychological tests in individuals with mild vs more severe traumatic brain injuries. *Brain Injury*, 26 (1), 36-47.
- Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G.(1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203-220.
- Kinsella, G., Murtagh, D., Landry, A., Homfray, K., Hammond, M., O'Beirne, L., ...& Ponsford, J. (1996). Everyday memory following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 10, 499-507.
- Kliegel, M., Eschen, A., & Thöne-Otto, A.I.T. (2004). Planning and realization of complex intentions in traumatic brain injury and normal aging. *Brain and Cognition*, 56, 43-54.
- Kramer, J.H., Rosen, H.J., Du, A-T., Schuff, N., Hollnagel, C., Weiner, M.W.,..., & Delis, D.C. (2005). Dissociation of hippocampal and frontal contributions to episodic memory performance. *Neuropsychology*, 19 (6), 799-805.
- Kruger, L.E., & Salthouse, T.A. (2011). Influence of cognitive abilities and age on word recall performance across trials and list segments. *American Journal of Psychology*, 124 (3), 291-300.
- Lee, T., Crawford, J.D., Henry, J.D., Trollor, J.N., Kochan, N.A., Wright, M.J.,..., & Sachdev, P.S. (2012). Mediating effects of processing speed and executive functions in age-related differences in episodic memory performance: a cross-validation study. *Neuropsychology*, 26 (6), 776-784.
- Levine, B., Stuss, D.T., & Milberg, W.P. (1997). Effects of aging on conditional associative learning: process analyses and comparison with focal frontal lesions. *Neuropsychology*, 11 (3), 367-381.
- Levine, B., Cabeza, R., McIntosh, A.R., Black, S.E., Grady, C.L., & Stuss, D.T. (2002). Functional reorganization of memory after traumatic brain injury: a study with H<sub>2</sub><sup>15</sup>O positron emission tomography. *Journal of Neurology, Neurosurgery, & Psychiatry*, 73, 173-181.
- Lieury, A., Iff, M., & Duris, P. (1976). *Normes d'associations verbales, Document ronéoté* [verbal association norms, ronéoté document]. Boulogne-Billancourt, France: Laboratoire de Psychologie expérimentale.
- Lucas, J.A., Ivnik, R.J., Smith, G.E., Bohac, D.L., Tangalos, E.G., Kokmen, E.,..., & Petersen, R.C. (1998). Normative data for the Mattis Dementia Rating Scale. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 20 (4), 536-547.
- Magnussen, S. (Ed), & Heilstrup, T. (Ed.) (2007). *Everyday memory*. Hove and New York: Psychological Press.
- Martins, I.P., Mares, I., Stilwell, P.A. (2012). How subjective are subjective language complaints. *European Journal of Neurology*, 19 (5), 666-671.



## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

- Matteau, E., Dupré, N., Langlois, M., Jean, L., Thivierge, S., Provencher, P., & Simard, M. (2011). Mattis Dementia Rating Scale 2 : screening for MCI and dementia. *American Journal of Alzheimer's disease and Other dementias*, 26 (5), 389-398.
- Moffat, S.D., Zonderman, A.B., & Resnick, S. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, 787-796.
- Nilsson, L-G., & Larsson, M. (2007). Self-referent beliefs about memory and actual performance: relationship with age and sex. In S. Magnussen & T. Heilstrup (Eds). *Everyday memory* (pp 275-289), Hove and New York: Psychology Press:.
- Ossher, L., Flegal, K.E., & Lustig, C. (2013). Everyday memory errors in older adults. *Aging, Neuropsychology, & Cognition*, 20 (2), 220-242.
- Ozen, L.J., Skinner, E.I., & Fernandes, M.A. (2010). Rejecting familiar distracters during recognition in young adults with traumatic brain injury and in healthy older adults. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 16, 556-565.
- Paolo, A.M., Tröster, A.I., & Ryan, J.J. (1997). California Verbal Learning Test: Normative data for the elderly. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 19 (2), 220-234.
- Pearman, A., & Storandt, M. (2004). Predictors of subjective memory in older adults. *The Journals of Gerontology, series b*, 59 (1), 4-6.
- Pierce, B.H., Sullivan, A.L., Schacter, D.L., & Budson, A.E. (2005). Comparing source-based and gist-based false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 19 (4), 411-419.
- Plancher, G., Guyard, A., Nicolas, S., & Piolino, P. (2009). Mechanisms underlying the production of false memories for famous people's names in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 47, 2527-2536.
- 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.
- Reid, L. M., & McLullich, A. M. (2006). Subjective memory complaints and cognitive impairment in older people. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 22, 471-485.
- 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), 741-750.
- Reitan R.M. (1992). *The trail making test: Manual for administration and scoring*. Tucson: Neuropsychology Laboratory.
- Salthouse, T.A. (1996). The processing speed theory of cognitive aging. *Psychological Review*. 103, 403-428
- Sauzéron, H., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Déjos, M., Zheng, X., ..., & N'Kaoua. B. (2012). The use of virtual reality for episodic memory assessment: effects of active navigation. *Experimental Psychology*, 59 (2), 99-108.
- Saykin, A.J., Wishart, H.A., Rabin, L.A., Santulli, R.B., Flashman, L.A., West, J.D.,..., & Mamourian, A.C. (2006). Older adults with cognitive complaints show brain atrophy similar to that of amnesic MCI. *Neurology*, 67 (5), 834-842.
- Schiehser, D.M., Delis, D.C., Filoteo, J.V., Delano-Wood, L., Duke Han, S., Jak, A.J., ...& Bondi, M. (2011). Are self-reported symptoms of executive dysfunction associated with objective performance following mild-to-moderate traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 33 (6), 704-714.
- Schmand, B., Jonker, C., Geerlings, M.I, & Lindeboom, J. (1997) Subjectivememory complaints in the elderly: depressive symptoms and future dementia. *British Journal of Psychiatry*, 171, 373-376
- Schmitter-Edgecombe, M., & Seelye, A.M. (2012). Recovery of content and temporal order memory for performed activities following moderate to severe traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 34 (3), 256-268.
- Sedikides, C., & Gregg, A.P. (2008). Self-enhancement: Food for thought. *Perspectives on Psychological Science*, 3(2), 102-116.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

- Sorita, E., N’Kaoua, B., Larrue, F., Criquillon, J., Simion, A., Sauzéon, H., ..., & Mazaux, J-M. (2013). Do patients with traumatic brain injury learn a route in the same way in real and virtual environments ? *Disability & Rehabilitation*, 35 (16), 1371-1379.
- Stricker, J.L., Brown, G.G., Wixted, J., Baldo, J.V., & Delis, D.C. (2002). New semantic and serial clustering indices for the california verbal learning test-second edition: background, rationale, & formulae. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 8, 425-435.
- Stroop J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Stuss, D.T., Craik, F. I. M., Sayer, L., Franchi, D., & Alexander, M.P. (1996). Comparison of older people and patients with frontal lesions: evidence from word list learning. *Psychology and Aging*, 11, 387-395.
- Stuss, D.T., Bisshop, S.M., Alexander, M.P., Levine, B., Katz, D., & Izukawa, D. (2001). The Trail Making Test: a study in focal lesion patients. *Psychological Assessment*, 13 (2), 230-239.
- Stuss, D.T., Floden, D., Alexander, M.P., Levine, B., & Katz, D. (2001). Stroop performance in focal lesion patients: dissociation of processes and frontal lobe lesion location. *Neuropsychologia*, 39 (8), 771-786.
- Teasdale, G., & Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness. *The Lancet*, 304 (7872), 81-84
- Troyer, A. K., Graves, R. E., & Cullum, C. M. (1994). Executive functioning as a mediator of the relationship between age and episodic memory in healthy aging. *Aging and Cognition*, 1, 45-53.
- van Zomeren, A.H., & van den Burg, W. (1985). Residual complaints of patients two years of severe head injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery, & Psychiatry*, 48, 21-28
- Vakil, E., & Tweedy, J.R. (1994). Memory for temporal order and spatial position information: test of the automatic-effortful distinction. *Neuropsychiatry, Neuropsychology, and Behavioral Neurology*, 7, 281-288.
- Vakil, E. (2005). The effect of moderate to severe traumatic brain injury on different aspects of memory: a selective review. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 27, 977-1021.
- Volz-Sidiropoulou, E., & Gauggel, S. (2012). Do subjective measures of attention and memory predict actual performance ? Metacognition in older couples. *Psychology and Aging*, 22 (2), 440-450.
- Vendrell, P., Junqué, C., Pujol, J., Jurado, M.A., Molet, J., & Grafman, . (1995). The role of prefrontal regions in the Stroop task. *Neuropsychologia*, 33 (3), 341-352.
- Veterans Health Initiative (2010). *Traumatic Brain Injury*. Retrieved from <http://www.publichealth.va.gov/docs/vhi/traumatic-brain-injury-vhi.pdf>
- Wechsler, D. (1997). *Wechsler Memory Scale-III*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Wolbers, T. & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 138-146

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Table 1

Demographic characteristics and mean neuropsychological performances of Young Controls (YC), Healthy Older (HO) adults and TBI patients (standard deviations are in parenthesis). The one-way ANOVAs represent the group differences.

	YC	HO	TBI	ANOVA, F (2,42)
Sex	8F/8M	10F/5M	3F/12M	
Age	22.44 (2.05)	66.53 (3.43) <sup>a</sup>	36.27 (12.72) <sup>b, c</sup>	134, 61****, $\eta_p^2 = .86$
Educational level	14.37 (1.41)	14.47 (2.26)	13.01 (2.79)	2.04, <i>n.s.</i>
Computer Level	12.62 (5.29)	9.13 (4.31)	10.00(6.47)	1.75, <i>n.s.</i>
SSQ-total score	6.31 (10.99)	8.98 (8.09)	11.71(14.18)	.87, <i>n.s.</i>
GCS	-	-	5.86 (2.50)	-
Length of LOC (hrs)	-	-	161.14 (134.37)	-
Time since injury (years)			4.88 (4.44)	-
TMT score (seconds)	-.83 (1.25)	1.10 (.37) <sup>a</sup>	1.53 (1.15) <sup>b</sup>	24.10****, $\eta_p^2 = .53$
Stroop errors	.12 (.50)	2.00 (1.36) <sup>a</sup>	3.87 (3.87) <sup>b, c</sup>	11.33****, $\eta_p^2 = .35$
Digit Symbol Substitution Test	64.69 (7.32)	44.20 (7.25) <sup>a</sup>	33.20 (16.72) <sup>b, c</sup>	31.34****, $\eta_p^2 = .59$
CVLT learning	63.87 (8.51)	51.53 (9.33) <sup>a</sup>	39.80 (13.53) <sup>b, c</sup>	19.84****, $\eta_p^2 = .48$
CVLT corrected recognition	.92 (.10)	.76 (.19)	.63 (.28)	10.11****, $\eta_p^2 = .32$
total QAM	16.56 (2.97)	22.80 (4.44) <sup>a</sup>	33.67 (11.59) <sup>b, c</sup>	21.68****, $\eta_p^2 = .50$

Note: SSQ = Simulator Sickness Questionnaire; GCS = Glasgow Coma Scale ; LOC = Loss of Consciousness, TMT = Trail Making Test; QAM = Questionnaire d'Auto-Evaluation de la Mémoire (Memory Self-Evaluation Questionnaire). Significant Group effects as follows : \*,  $p < .05$ ; \*\*,  $p < .01$ , \*\*\*,  $p < .001$ ; \*\*\*\*,  $p < .0001$ , with:

<sup>a</sup> Significant group difference of older adults with the younger control group.

<sup>b</sup> Significant group difference of TBI patients with the younger control group.

<sup>c</sup> Significant group difference of TBI patients with older adults.

EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Table 2

Mean performances of young controls (YC), healthy older adults (HO) and TBI patients on HOMES memory measures (standard deviations are in parenthesis).

Groups	Learning		PI		Semantic clustering		Retrieval		False. Recog.		Corr. Recog.
	<i>Trial 1</i>	<i>Trial 2</i>	<i>Trial 1</i>	<i>Version B</i>	<i>Trial 1</i>	<i>Trial 2</i>	<i>FR</i>	<i>Recog. hits</i>	<i>Source-based</i>	<i>Gist-based</i>	
YC	.79 (.15)	.86 (.08)	.79 (.15)	.69 (.17)	17.21(8.13)	21.42 (5.67)	.86 (.08)	.88 (.09)	.15 (.14)	.03 (.05)	.78 (.13)
HO	.53 (.10)	.69 (.11)	.53 (.10)	.50 (.14)	12.30 (4.36)	19.34 (5.31)	.69 (.11)	.78 (.11)	.32 (.25)	.13 (.14)	.56 (.14)
TBI	.44 (.16)	.58 (.18)	.44 (.16)	.43 (.24)	11.39 (8.28)	17.09 (9.02)	.58 (.18)	.80 (.12)	.28 (.19)	.18 (.19)	.56 (.20)

ANOVAs, F (2, 43)						
Group effect	29.64****	18.07****	2.72	12.62****	6.33**	10.11****
<i>YC vs. HO</i>	**	****	-	***	**	****
<i>YC vs. TBI</i>	****	****	-	****	**	****
<i>HO vs. TBI</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	-	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>
Memory effect	38.97****	4.12*	34.78****	35.14****	19.94****	-
Interaction	1.69, <i>n.s.</i>	1.34, <i>n.s.</i>	0.74, <i>n.s.</i>	9.22***	0.71	-

Note. PI = Proactive interference; False. Recog. = False recognition; Corr. Recog. = Corrected recognitions; FR = Free recall trial 2; Recog. Hits = Recognition hits.

Effect significance: \*\*\*\* p <.0001; \*\*\* p <.001; \*\* p <.01; \* p <.05

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Table 3

Correlation data for YC and HO performances with: 1) In the top part, the Pearson's correlations between age, HOMES measures, neuropsychological measures and the SMC; and 2) In the bottom part, the partial correlations between age and HOMES or SMC measures controlling for EF, SP and EM, respectively.

	<b>Age (<i>n</i> = 31)<sup>a</sup></b>	<b>EF</b>	<b>SP</b>	<b>EM</b>	<b>Total QAM</b>
<b><i>HOMES measures</i></b>					
Learning	<b>-.78****</b>	<b>-.81****</b>	<b>.63****</b>	<b>.49**</b>	<b>-.55****</b>
Recognition hits	-.45	-.30	.40	.16	-.19
Corrected recognition	<b>-.65****</b>	<b>-.53**</b>	<b>.49**</b>	<b>.46**</b>	-.37
False recognitions	<b>.48**</b>	<b>.46**</b>	-.30	-.45	.33
Total QAM	<b>.65****</b>	<b>.66****</b>	-.40	-.35	-
Age	-	<b>.82****</b>	<b>-.82****</b>	<b>-.55****</b>	
<b><i>Partial correlation controlled for</i></b>					
		<b>EF</b>	<b>SP</b>	<b>EM</b>	
Age * Learning		-.35	<b>-.60****</b>	<b>-.70****</b>	
Age * corrected recognition		<b>-.44*</b>	<b>-.51**</b>	<b>-.54**</b>	
Age * False recognitions		.21	<b>.44*</b>	-.32	
Age * Total QAM		.26	<b>.62****</b>	<b>.59****</b>	
<b><i>QAM * Learning controlled for</i></b>					
		-.04	<b>-.41*</b>	<b>-.46*</b>	

Note. <sup>a</sup> To carry out correlations with age YC and HO performances were taken together. For zero-order correlations, the level of significance was set to  $p < .01$  to correct for multiple correlations. Significant correlations are in bold with: \*\*\*\*  $p < .0001$  ; \*\*\*  $p < .001$  ; \*\*  $p < .01$  ; \*  $p < .05$ .

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Table 4

Correlation data for TBI patients' performances including Pearson's correlations between HOMES indices and total QAM, executive functioning, speed of processing, or episodic memory composite scores.

	EF	SP	EM
<i>HOMES measures</i>			
Learning	-.03	.40	<b>.66*</b>
Recognition hits	-.08	.42	<b>.73*</b>
Corrected recognition	.06	.48	.64
Total False recognitions	-.18	-.37	-.31
Total QAM	.05	-.19	-.57

Note : Significant correlations are presented in bold with an alpha at <.01.

## EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI

Figure 1. The kitchen

EVERYDAY MEMORY IN AGING AND TBI





**II. Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory (La mémoire quotidienne des objets dans le vieillissement et dans la maladie d'Alzheimer évaluée dans un environnement visuellement complexe : le rôle du fonctionnement exécutif et de la mémoire épisodique). Soumis dans *Journal of Neuropsychology*.**

## Journal of Neuropsychology

Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory.  
--Manuscript Draft--

Article Type:	Research Paper
Manuscript Number:	
Full Title:	Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory.
Order of Authors:	Prashant Arvind Pala, PhD Bernard N'Kaoua Marie Déjos Mathieu Taillade Sophie Auriacombe Hélène Sauzéron
Corresponding Author:	Hélène Sauzéron University of Bordeaux Segalen Bordeaux, FRANCE
Corresponding Author E-Mail:	helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr
Keywords:	everyday-like memory; normal aging; Alzheimer's disease; virtual reality; executive functioning; episodic memory
Abstract:	To investigate everyday memory, more and more studies rely on virtual-reality applications to bridge the gap between in situ approaches and laboratory settings. In this vein, the present study was designed to assess everyday-like memory from the virtual reality-based HOMES test (Sauzéron et al., 2012) in aging and Alzheimer's disease (AD). Two aims motivated this study: first, to assess multiple processes of episodic memory functioning embedded within contexts closely related to real life in aging and AD using the multi-trial free recall paradigm, and second, to evaluate the mediating effects of executive functioning, episodic memory and subjective memory complaints (SMCs) on age differences in the HOMES measures and in AD. To this end, the HOMES test and neurocognitive tests of executive functioning and episodic memory were administered to 23 younger adults, 23 older adults and 16 patients with AD. The results were: First, age-differences on the HOMES test are observed in memory indices relative to true memory and they are mainly mediated by executive functioning while age differences are not observed on false memory indices that are mainly mediated by episodic memory; second, the AD patients were impaired on every measure relating both to true and false memory with an additional impairment in semantic clustering. However, only their true memory performances were associated with episodic memory. Overall, the results supported that VR-based memory test is an appropriate device to capture age-related differences as well as the AD effect with respect to both in situ and laboratory settings.
Additional Information:	
Question	Response
If you have any potentially competing interests to declare, please enter them in the box below. If you have no interests to declare, please enter 'none'.	None
Does this submission have any links or overlap with any other submitted or published manuscripts, for this or any other publication? (For example; as part of a long-term project, using a shared data set, a response to, or extension of,	None

earlier work.) If yes, please give brief details. If no, please enter 'none'. Any overlap not declared and later discovered will result in the manuscript being withdrawn from consideration.	
Please specify the word count of your manuscript (excluding the abstract, tables, figures and references).	Word count: 7120

Running head: AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory.

Arvind Pala, Prashant<sup>1</sup>, N'Kaoua, Bernard<sup>1,2</sup>, Déjos, Marie, Taillade, Mathieu<sup>1</sup>, Auriacombe, Sophie<sup>3</sup>, & Sauzéon, Hélène<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux, Université Bordeaux Segalen, Bordeaux France

<sup>2</sup>INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), Bordeaux, France

<sup>3</sup>Hôpital Pellegrin, Tastet-Girard, Service Consultation Mémoire, Bordeaux

Correspondence should be addressed to Hélène Sauzéon, Laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux, Bât 1B 1er étage, 33000 Bordeaux, France, Tel: + 33620663177; E-mail: helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

### Abstract

To investigate everyday memory, more and more studies rely on virtual-reality applications to bridge the gap between *in situ* approaches and *laboratory* settings. In this vein, the present study was designed to assess everyday-like memory from the virtual reality-based HOMES test (Sauzéon et al., 2012) in aging and Alzheimer's disease (AD). Two aims motivated this study: first, to assess multiple processes of episodic memory functioning embedded within contexts closely related to real life in aging and AD using the multi-trial free recall paradigm, and second, to evaluate the mediating effects of executive functioning, episodic memory and subjective memory complaints (SMCs) on age differences in the HOMES measures and in AD. To this end, the HOMES test and neurocognitive tests of executive functioning and episodic memory were administered to 23 younger adults, 23 older adults and 16 patients with AD. The results were: First, age-differences on the HOMES test are observed in memory indices relative to true memory and they are mainly mediated by executive functioning while age differences are not observed on false memory indices that are mainly mediated by episodic memory; second, the AD patients were impaired on every measure relating both to true and false memory with an additional impairment in semantic clustering. However, only their true memory performances were associated with episodic memory. Overall, the results supported that VR-based memory test is an appropriate device to capture age-related differences as well as the AD effect with respect to both *in situ* and *laboratory* settings

*Keywords:* everyday-like memory, aging, Alzheimer's disease, virtual reality, executive functioning, episodic memory.

## 1. Introduction

In our daily life, an accurate memory for objects (or the content of an event) that we encounter or use is embedded within its contexts (e.g., where and when an object was viewed or used to carry out a meaningful daily activity) as a part of episodic memory (Tulving, 2002). Thus, contexts function as retrieval cues for objects, and both contexts (e.g., where and when) and objects are fully recollected with details when individuals experience an episodic retrieval, that is, when they retrieve their past experienced events (Buckner, Koutstaal, Schacter, Dale, Rotte, & Rosen, 1998). Some aspects of episodic memory are well documented as declining in older adults (Foster, DeFazio and Bizon, 2012) and as strongly impaired at earlier stages of Alzheimer's disease (AD) (Yakushev et al., 2010). Thus, episodic memory functioning is primarily assessed in a clinical neuropsychological setting, but very few assessment tests are available for memory for objects, notably within a naturalistic environment. In the present work, we simulated a naturalistic home environment using virtual reality (VR) to specifically investigate object memory in normal aging and AD in terms of patterns of everyday-like memory drawn from multiple memory processes (learning, proactive interference, semantic clustering, retrieval, and false recognitions). We also examined relationships between the memory measures for VR-based objects and traditional neurocognitive measures for executive functioning and episodic memory.

In normal aging, several studies have shown declines in recall or recognition performances for non-verbal material such as the temporal order of meaningful actions (Zacks, Speer, Vettel, & Jacoby, 2006) or objects and their locations (Shih, Meadmore, & Liversedge, 2012). Given that item memory generally stays intact ( Craik and McDowd, 1987), age-related differences in object memory are mostly explained as failures in both strategic processing (i.e., self-initiating or implementing strategies) during encoding and retrieval and binding contextual elements into a coherent episode (also known as *the*

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

*associative deficit hypothesis*, for a recent meta-analysis, see Old and Naveh- Benjamin, 2008) that likely result from changes in functional connectivity between the prefrontal and mediotemporal cortices (Dennis et al., 2008).

Concerning AD, object-location memory impairment is seen today as a pervasive disability from the early stages of the disease that probably impacts the patient's everyday functioning (e.g., Brandt, Shpritz, Munro, Marsh, & Rosenblatt, 2005). This object memory impairment is associated with the starting point of the neurofibrillary tangles in the perirhinal cortex in AD (Braak & Braak, 1991; Scheltens et al., 1992). The role of the perirhinal cortex is known in visual memory for objects, especially in recognition memory (Ranganath, 2010), but also in binding objects to contexts (Watson, Wilding, & Graham, 2012).

Studies on the memory of objects give some insights into the functioning of everyday memory but their scope remains restrictive because tasks assessing object memory often fail to cover important aspects of everyday memory such as contextual richness which requires selecting to-be-remembered objects in complex scenes. This contextual richness makes both learning and retrieval more selective in real life compared to laboratory experiments (Neisser, 1996). Also, the selection of objects in everyday life scenes is a continuous activity since individuals are frequently in motion in order to visually explore environments (Pylyshyn, 2001). These contextual features and dynamic aspects of events are at the very core of everyday episodic memory formation, which heavily draws on vision in the real world (Conway, 2001; Hollingworth, 2006). Memory assessments based on Virtual Reality (VR) seem to fulfill these real-life aspects. Indeed, VR applications enable to recreate conditions similar to that of the real world by computer-generating complex environments such as cities, buildings, roads, houses, moving objects and avatars in 3-dimensions (3D). Hence, VR applications are seen today as relevant experimental models of the real world to study how cognitive processes are embodied in complex and more natural behaviors (for a review see

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Rizzo, Schultheis, Kern, & Mateer, 2004). For example, spatial navigation and spatial memory difficulties in normal aging and AD are extensively studied in large scale environments using VR-based applications with 3D adaptations of both laboratory tests (Laczo et al., 2010) and naturalistic environments ( Kessels, van Doormal, & Janzen, 2011; Widmann, Beinhoff, Riepe, 2012). The use of large-scale environments is particularly fruitful to study the binding processes required especially for the formation of allocentric spatial memory (i.e., configurational linkage of landmarks for a given space, O'Keefe & Nadel, 1978), but such environments give little information on the memory for everyday objects in small and closed environments such as offices, homes, etc. Yet, elderly people self-report memory failures about events that occurred at someone else's place, what they have read, what they have watched on television, or what they have said or done compared to getting lost in familiar spaces (Calabria, Manenti, Rosini, Zanetti, Miniussi, Cotelli, 2012; Taillade et al., 2012). To our knowledge, only one VR-based study has specifically examined memory for objects in a complex small-scale environment (Sauzéon et al., 2012). Sauzéon and colleagues adapted the traditional multi-trial verbal list learning paradigm (e.g., California Verbal Learning Test, CVLT, Delis et al., 2000) to a virtual environment called the Human Object Memory for Everyday Scenes Test (HOMES). As in the CVLT, participants were intentionally instructed to memorize every objects for a subsequent memory test during their navigation in a computer-guided tour of rooms in one of the two versions of a virtual apartment. One of the versions was presented twice (i.e., two learning trials) during the encoding phase followed by the second version which was presented as an interference trial. Immediate free recalls and a delayed yes/no recognition tasks were administered. Using this test, an everyday-like episodic memory for objects can be studied in a more realistic fashion (see the procedure for more details) together with the use of an intentional encoding instruction to remain closer to traditional tests of episodic memory. In fact, this kind of



## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

procedure can be used to examine memory processes such as *learning* (defined as increased recall performances across trials with repeated exposure to stimuli, Constantinidou & Baker, 2002), *proactive Interference* (PI, defined as the detrimental effect of prior learning on the subsequent retrieval of newly learned information, Keppel & Underwood, 1962), *semantic clustering* (retrieving and gathering all of the semantically related items as they pop up into the mind one by one during free recall, Bousfield, 1953), *recognition accuracy* which is compared to the free recall performances as a measure of retrieval strategy ( Craik & McDowd, 1989) and *false recognitions* (an individuals' susceptibility to mistakenly recognize words, picture, or events that either have never been observed but which are semantically-related to studied items, or that have been studied within another context than the target one, Pierce, Sullivan, Schacter, & Budson, 2005) all together.

Studies using traditional verbal learning and memory tests have already shown the clinical utility of such list-learning paradigms in obtaining memory profiles that are very specific to different neurological conditions (Baldo, Delis, Kramer, & Shimamura, 2002; Delis et al., 1991). CVLT-like indices independently used in several different experimental paradigms have helped to establish a memory profile for older adults who also show poor recall and a slower learning rate (Constantinidou & Baker, 2002), a greater susceptibility to PI (Ebert & Anderson, 2009) and to false recognitions compared to younger adults (Pierce et al., 2005), that contrast with a spared semantic clustering performance and the quasi-normalized recollection in the recognition condition (a greater benefit from recognition compared to recall) (Delis et al., 2000, Greenaway, Lacritz, Binengar, Weiner, Lipton, & Munro Cullum, 2006). This memory pattern is usually seen as being more related to a decline in strategic processing with aging that impacts episodic memory functioning (Braver, & West, 2008).

Regarding AD, the CVLT has also shown that patients display an equally poor recall and recognition performance as well as a deficit in semantic clustering (Aronoff et al., 2006;

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Delis et al., 1991); patients further demonstrate reduced learning and rapid forgetting, but also an abnormal suppression of the build-up of PI and higher susceptibility to false recognitions (Lekeu et al., 2010) particularly after multiple exposure to word lists (Budson, Daffner, Desikan, & Schacter, 2000). This memory pattern is usually interpreted as an impairment in both episodic memory and semantic processing (consistent with the mediotemporal lobe pathology in AD, Greenaway et al., 2006). Performance on the CVLT has been specifically implicated in discriminating between normal aging, MCI (Mild cognitive impairment) and AD (Greenaway, et al., 2006; Royall, Chiodo, & Polk, 2004) where some CVLT indices maybe more sensitive to frontal/executive dysfunctioning and others to medial temporal/episodic memory impairment. Therefore, collecting CVLT-like memory indices within a naturalistic virtual environment represents a unique opportunity to investigate such memory indices in everyday-like settings. Additionally, the study of their relationships with measures of frontal/executive and medial temporal/episodic memory functioning may give insights into mechanisms of everyday memory processes that are still not clearly understood (Simons & Spiers, 2003). To our knowledge, associations between multiple memory processes using the VR-based object learning paradigm and executive functioning and memory have not yet been investigated in normal aging and AD despite its previously noted probable clinical relevance for neuropsychological assessment (Wolk & Dickerson, and the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, 2011).

In this research line, the present study used the HOMES test in an everyday-like setting to investigate multiple memory processes in normal aging and in AD. First, we specifically expected to replicate either in part or as a whole the memory profiles of these two populations as previously described. Second, we sought to investigate the potential mediation effect of executive functioning and episodic memory (as assessed by traditional neuropsychological tests) on age-related differences in normal aging but also in AD. Since we

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

are investigating episodic memory functioning in an environment closer to a real one, we also investigated the relationship between self-reported everyday memory complaints and decreased memory performances on the HOMES memory measures in normal aging and AD.

### **2. Method**

#### *2.1. Participants*

Twenty-three younger adults, 23 healthy older adults, and 16 patients with mild-to-moderate AD participated in this study. All of the young participants were volunteer students at the University of Bordeaux Segalen. Older participants were recruited from community leisure institutions (OAREIL, Université du Temps Libre). AD patients were recruited from local retirement homes and from the Pellegrin Hospital's Memory consultation service. Participants were interviewed for the following exclusion criteria: history of neurological (i.e., dementias other than AD concerning the patients, cerebrovascular accident, traumatic brain injuries, etc.) or psychiatric disorders, alcohol or substance abuse or any medication altering cognitive performances. Both the older participants and patients were screened using the MMSE (Mini Mental Status Examination; Folstein, Folstein, & McHugh, 1975). The older adults had a mean MMSE score of 28.96 (SD = 1.43, range = 24-30). The MMSE scores of AD patients ranged from 12 to 28 and were in the mild-to-moderate stage of dementia severity (M = 21.62, SD = 4.32). Patients were diagnosed with probable AD according to the National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke and the Alzheimer's disease and Related Disorders Association (McKhann et al., 1984). Patients were matched to healthy older adults in terms of age (AD, M = 78.62, SD = 7.89, range = 65-92; older adults, M = 73.60, SD = 3.27, range = 60-93). The ages of the younger adults ranged from 19 to 25 (M = 22.30, SD = 1.82). Patients (AD, M = 11.19, SD = 4.75, range = 6-17) had levels of education that were similar to both the older adults (M = 13.35, SD = 2.96, range

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

= 6-18) and the younger adults ( $M = 14.26$ ,  $SD = 1.35$ , range = 13-17). The present study was made in compliance with the local ethics committee and all participants (and caregivers when appropriate) gave their written informed consent.

All of the participants had also to complete a French version of the SSQ (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993) which measures the severity of sickness induced by 3D simulators (e.g., virtual reality). The questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered into three factors: Oculomotor, Nausea and Dizziness. The 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. The weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy et al. (1993). Participants also filled in the New Technology (NT) questionnaire (Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001) which measures their level of experience with computers, computer games, and games involving VE; each of these three items was rated from 0 to 7 (the maximum score was 21 for each participant). Their everyday subjective memory complaints (SMCs) were assessed using the memory Self-Evaluation Questionnaire-short form (QAM-short form; Clément, Belleville, Gauthier, 2008)<sup>1</sup>. A full description of the three groups according to their demographic characteristics and neurocognitive performances are summarized in Table 1.

-----  
Insert Table 1  
-----

### 2.2. Materials

---

<sup>1</sup> The QAM-short form separately measures three dimensions of everyday memory difficulties: QAM 1 - overall everyday memory difficulty; QAM 2 - memory difficulties related to everyday conversations; and QAM 3 - difficulties related to watching movies and reading books. Ratings are based on a Lickert scale from 1 [lowest rating, corresponding to never] to 6 [highest rating, corresponding to always] with a maximum score of 6 on the first dimension, 36 on the second and 24 on the third dimension. The total QAM score was calculated by adding the QAM 1, 2 and 3 scores.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

The virtual environment was viewed using a F1+ overhead video projector on a 2 x 1.88 meter large screen fixed onto the wall. We used a Dell® processor (3 GHz, 5 Gbytes in RAM) and a NVidia® Quadro FX 4400 graphic card to generate a virtual apartment built using the Virtools® software. Participants sat 2 meters away from the display screen in a dark, silent room to visualize the VE projected in front of them. Each participant visualized two versions (versions A and B) of a virtual apartment (see Figure 1c for a bird's eye view of the apartment) comprised of four rooms: a bedroom (Fig. 1 a-b), a bathroom, a kitchen, and a living room. Each room contained 10 target objects, five of which were only viewed in one of the two versions while the other five were viewed in both versions (e.g., *a pant* was on the *bed* in version A but a *robe* replaced it on the same bed in version B). Therefore, there were 40 target (or intended) objects: 20 objects that were only viewed in one version, 20 objects only viewed in the other version and 20 objects common to both versions (see appendix A). However, to fit the “face validity”, that is, in order to give a realistic rendering of the apartment, each room contained additional objects that were not targeted and therefore, were held constant across both versions (e.g., the floor, the windows, the view of the landscape outside the apartment, etc.). Target objects in the two versions were equivalent in terms of verbal (Ferrand & Alario, 1998) and visual association norms (Alario & Ferrand, 1999).

-----

Insert Figure 1

-----

### 2.3. Procedure

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

The procedure was identical to that described by Sauzéon et al. (2012) and consisted of a learning phase and a retrieval phase (see Figure 2 for the task design).

Neuropsychological tests were administered in a counterbalanced order before the VR-based assessment for half of the participants and immediately after for the other half in each group to control for order effects.

The learning phase consisted of two study test trials in which participants first watched a target version of the apartment (called version A). The target version was presented twice (trial 1 and 2) and each participant was asked to complete a free recall task immediately after each presentation. Before each presentation, the experimenter gave the following instruction to participants: "Carefully watch everything in the apartment because you will have to immediately recall all of the objects you previously saw". Immediately after the second trial, participants visualized the other version of the apartment (version B) followed by only one immediate free recall task. The instruction was identical to that of the target version. Participants watched each room in each version during 50 seconds; since there were 4 rooms (corresponding to the 4 categories), the total amount of time spent watching each version lasted 200 seconds. This computer-guided "passive" exploration of the apartment was preferred in order to neutralize any biases due to possible individual differences in navigation speed and the use of interaction devices such as joysticks and keyboards, although a more self-paced "active" exploration would surely be an interesting way to simulate a more realistic visit of the apartment. The presentation of the two versions was counterbalanced across the participants (i.e., half of the participants watched one version first as the target version, the other half watched the other version first making it the target one).

After the recall of version B, the subjects had to fill in the NT and the SSQ questionnaires described in the "participants" section within a delay of 10 minutes.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

After this 10 minute delay, a verbal yes/no recognition task was administered to participants as a final retrieval phase. Since both versions of the apartment were counterbalanced across participants, two lists containing 56 words each were constructed accordingly: the first list corresponded to one version as the target apartment and the second list to the other version as the target apartment. Words were printed in black using a Calibri font (police size = 44) on a white background. Each list of words was comprised of 40 target items and 16 foils individually presented in a pseudo-random order on A4 format paper stored inside a binder. Among the targets, 20 items were specific to the target version (version A) and 20 were common to both versions (i.e., studied during the presentation of both versions). Among the foils, 8 items were specific to version B and were considered as source lures; the 8 remaining items were unstudied items considered as gist lures (they were not presented during the encoding phase but were semantically related to the target items and had similar constructions in terms of the associative norms criteria). For each item, participants decided whether or not it had been presented in the target version of the apartment (“yes”) or not (“no”). Thus, if a source lure was recognized as a target, the subject made a source-based false recognition; if a gist lure was recognized as a target, the participant made a gist-based false recognition.

-----

Insert Figure 2

-----

### 2.4. Scoring

Learning was measured as the proportion of correct free recall for trials 1 and 2 of the target version. The free recall score was calculated by giving 1 point each time the subject

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

correctly recalled an item (with a maximum of 40 points since there were 40 target items) and was calculated as the mean proportion of objects correctly recalled. The encoding strategy was measured as the proportion of semantic clustering of items for each of the two trials of the target version. Semantic clustering was scored using the List-Based Clustering (LBC, Stricker et al., 2002). The LBC calculates an expected cluster value, the number of clusters expected by chance (EXP), based on the number of objects recalled ( $r$ ), the number of objects in a category ( $m$ ), and the total number of objects studied ( $N_L$ ):  $EXP = [(r-1)*(m-1)]/(N_L-1)$ . The LBC score is calculated by subtracting the expected value given in the above equation from the observed (OBS) number of clusters [ $LBC = OBS - EXP$ ]. OBS was calculated by giving one point each time two objects belonging to the same semantic category were recalled consecutively (e.g., *the wardrobe* followed by *the lamp*, both belonging to the bedroom). Hence, the maximum score for the VR-based semantic clustering is 27 ( $r = 40$ ; observed = 36) and the minimum score is -9 ( $r = 40$ ; observed = 0). PI was assessed as the discrepancy between the free recall performances for list A and list B (free recall trial 1 version A vs. free recall of list B). Recognition hits were calculated as the proportion of correctly recognized target items out of 40. Finally, false recognitions were measured as the proportion of false alarms (FA) during the recognition task, separately for source-based false recognitions (number of source-based lures incorrectly recognized as targets divided by the total number of source-based lures in the list) and gist-based false recognitions (number of gist-based lures incorrectly recognized as targets divided by the total number of gist-based lures in the list).

### *2.5. Neuropsychological battery*

#### *2.5.1. Episodic memory.*

The French version of the California Verbal Learning Test (CVLT, Delis et al., 2000; Poitrenaud, Deweer, Kalafat, & Van der Linden, 2007) was administered as a measure of



## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

verbal learning and episodic memory. Participants are presented with a Monday shopping list of 16 words belonging to four different semantic categories (spices, clothes, tools, and fruits) which is read aloud five times by the experimenter one item at a time. Participants are told to immediately recall items after each presentation in any order (i.e., free recall). This study-test trial phase is immediately followed by the presentation of the Tuesday shopping list which also consists of 16 words, half of which belong to two shared categories (e.g., fruits and spices) while the other half are new words from two different categories (i.e., fish and kitchen tools). At the end of the test, a yes/no recognition task is also administered. For a full description of the procedure, see Delis et al. (2000). A measure of learning and recognition hits were used as measures of verbal episodic memory. Learning was measured as the total correct free recalls from trials 1 to 5 (max. score = 80). Recognition hits were measured as the proportion of correctly recognized target items out of 16.

### *2.5.2. Executive functioning.*

Executive functioning was assessed using the backward Corsi block tapping task (as a part of a full administration of the task, WMS-III, Wechsler, 1997), the mental rotation test (Vanderberg & Kuse, 1978), and the Stroop Color-Word test (Stroop, 1935). The backward Corsi block tapping and the mental rotation tasks are mainly visuospatial tasks; it is also assumed that they depend on high-level strategic control and executive processes (Vandierendonck, Kemps, Fastame, & Szmalec, 2004). A short description of each test is provided in Appendix 2.

### *2.6. Statistical analysis*

Statistical analyses were performed following two steps. First, a series of mixed-design ANOVAs were carried out to compare the performances of the three groups: younger adults, older adults and AD patients. The group was the between-subject variable and each

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

memory measure on the HOMES memory test was the within-subject variable [learning (trials: trial 1 vs. trial 2), semantic clustering (trials: trial 1 vs. trial 2), retrieval (tasks: free recall trial 2 vs. recognition hits), PI (versions: version A free recall trial 1 vs. version B free recall trial 1), and false recognitions (type of lures: source-based lures vs. gist-based lures). Mean performances were expressed as the proportion of correct free recalls (for learning and PI), recognition hits (for retrieval), and false recognitions (separately for source-based false recognitions and gist-based false recognitions), and mean LBC scores for semantic clustering. The alpha level of significance was set at 0.05. Effect sizes were estimated by the partial eta squared calculated as:  $\eta_p^2 = SS_{\text{effect}} / (SS_{\text{effect}} + SS_{\text{error}})$  (Cohen, 1988). According to Guéguen (2009), we considered effect sizes as small for  $\eta_p^2 < .06$ , medium for  $.06 \leq \eta_p^2 < .14$ , and marked for  $\eta_p^2 \geq .14$ . Post-hoc tests were carried out using Scheffé's procedure.

In a second step, before we began to test the effects of executive functioning and episodic memory as assessed by neurocognitive tests on the relationship between age and HOMES-based measures of object memory, we examined correlations between the executive functioning tests. As all of the executive functioning tasks were correlated between each other, this allowed us to calculate a composite executive functioning (EF) score. To that purpose, the z-scores of each test were calculated and averaged. Similarly, the CVLT free recall trials 1 and 5 and recognition hits were transformed into z-scores and then averaged in order to calculate a composite verbal episodic memory (EM) score. Finally, composite measures of *everyday-like true memory* and *false memory* were calculated by averaging the z-scored free recalls (trials 1 and 2 version A, trial 1 version B) and recognition hits for the former and the z-scored source-based and gist-based false recognitions for the latter from the HOMES test. Following the method recommended by Bryan and Luszcz (1996), age was coded as a dichotomous variable (younger participants = 0, older participants = 1) given that such variables in a between-group design are bimodally distributed and tend to inflate the

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

correlations because the range of scores is overestimated. This allowed us to perform the mediation analysis using partial correlations between the VR-based memory measures and age, while controlling for the effect of executive functioning, verbal episodic memory and self-reported memory complaints. The relationship between these measures was examined separately in AD patients.

### **3. Results**

#### *3.1. Neuropsychological tests of executive functioning and verbal episodic memory*

The performances on each neuropsychological test between the three groups (younger adults vs. older adults vs. AD patients) were compared using factorial design ANOVAs with the group as the between-subject variable and each measure from the neurocognitive tests as the dependent variable. Performances are summarized in Table 1.

Generally, as expected, younger adults outperformed older adults on all of the executive functioning tests. Impaired performances were also demonstrated by AD patients with lower scores on all executive functioning tests compared with younger and older adults, except for the mental rotation test in which older adults and patients performed similarly. On the verbal episodic memory test, we also showed age differences on the learning measure. For instance, older adults demonstrated lower scores in the total free recall trials 1-5 compared with younger adults. Both age groups had equally higher recognition scores. However, both groups outperformed AD patients on each of these measures, showing memory impairment in AD patients according to its diagnostic. When their subjective memory complaints were assessed using the QAM questionnaire, AD patients complained more than younger adults and older adults, who in turn complained more than younger adults.

#### *3.2. Internal consistency*

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Internal consistency of the VR-based assessment was based on Cronbach's alpha (Cronbach, 1951). The overall Cronbach alpha across version A free recall trials 1 and 2, version B free recall, recognition hits, LBC trial 1 and 2, source-based and gist-based false recognitions was .86, which indicates a good internal consistency.

### *3.3. VR-based performances (see Table 2 for means and standard deviations)*

#### *3.3.1. Learning.*

The 3 (group: younger adults vs. older adults vs. AD patients) X 2 (trials: trial 1 vs. trial 2) mixed-design repeated measure ANOVA with learning trials as the within-subject variable yielded a significant effect of group,  $F(2, 59) = 92.43$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .76$ . Indeed, younger adults performed significantly better than older adults ( $p < .0001$ ) on the free recall tasks, who in turn showed better recall performances than AD patients ( $p < .0001$ ). There was also a significant effect of learning trials,  $F(1, 59) = 52.27$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .47$ , with recall performances improving from trial 1 to trial 2 during the learning phase for target version A. A significant group X trial interaction was also observed, mostly due to the impaired performance of AD patients compared to both younger and older adults,  $F(2, 59) = 4.26$ ,  $p < .05$ ,  $\eta_p^2 = .13$ . In fact, while older adults demonstrated a learning ability across trials despite their lower recall performances compared to younger adults, AD patients could not improve their free recall.

#### *3.3.2. Proactive interference.*

The 3 (group) X 2 (versions: version A free recall trial 1 vs. version B free recall trial 1) ANOVA with the versions of the apartment as the within-subject variable showed a significant main effect of group  $F(2, 59) = 55.18$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .65$ . Post-hoc comparisons revealed that younger adults ( $p < .01$ ) performed significantly better on free recall tasks compared to older adults, who in turn performed better than AD patients ( $p < .0001$ ). There

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

was also a main effect of versions, as the performances on the recall task for trial 1 in version A were better than those on the unique free recall trial in version B,  $F(1, 59) = 13.67$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .19$ . The significant group X versions interaction, driven by a floor effect in the free recall performances of AD patients compared to older adults and to younger adults, both of whom showed better recall performances in version A compared to version B,  $F(2, 59) = 3.62$ ,  $p < .05$ ,  $\eta_p^2 = .11$ .

### *3.3.3. Semantic clustering*

The LBC scores were submitted to the same 3 (group) X 2 (trials) ANOVA with the learning trials (trial 1 vs. trial 2) as the within-subject variable and revealed a main effect of group,  $F(2, 59) = 45.95$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .61$ , and a significant main effect of trials,  $F(1, 59) = 29.93$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .36$ . Post-hoc comparisons revealed poor semantic clustering in AD patients compared to both younger ( $p < .0001$ ) and older adults ( $p < .0001$ ). However, both younger and older adults used semantic clustering equally well ( $p > .900$ ). The use of a semantic clustering strategy increased from trial 1 to trial 2 during the free recall of target version A. The significant group X trials interaction,  $F(2, 59) = 4.33$ ,  $p < .05$ ,  $\eta_p^2 = .13$ , was mainly qualified by the floor effect performance of AD patients on both trials compared to younger adults and older adults who increased their clustering from trial 1 to trial 2.

### *3.3.4. Retrieval.*

The same ANOVA conducted with the retrieval tasks (free recall trial 2 vs. recognition hits) used as the within-subject variable showed a main effect of group,  $F(2, 59) = 88.47$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .75$ , and a main effect of retrieval tasks,  $F(1, 59) = 83.93$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .59$ . The post-hoc follow up test revealed that poorer mean performances were recorded for older adults compared to younger adults ( $p < .0001$ ), and these performances were even poorer in AD patients compared with both younger and older adults ( $p < .0001$  and  $p < .0001$ , respectively); overall, the performances were better on recognition than on free recall. The

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

ANOVA also yielded a significant group X retrieval tasks interaction,  $F(2, 59) = 21.24$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .42$ , due to a greater difference between free recall and recognition performances in AD patients despite their poorer performances compared to the other groups in which this difference was smaller. In fact, older adults almost equalized their performances with younger adults.

### *3.3.5. Everyday false recognition.*

Finally, the 3 (group) X 2 (type of lures: source-based lures vs. gist-based lures) ANOVA conducted with the type of lure as the within-subject variable showed a significant main effect of group,  $F(2, 59) = 24.04$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .45$ , with older adults and younger adults equally susceptible to false recognitions ( $p > .100$ ), and with AD patients even more susceptible to false recognition than the two other groups ( $p < .0001$  for both groups). There was also a main effect of the type of lures with higher proportions of source-based lures compared to gist-based lures,  $F(1, 58) = 25.23$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .30$ . There was no significant interaction ( $p > .700$ ).

-----

Insert Table 2

-----

### *3.4. Mediation analysis*

Concerning the younger and older groups, significant negative correlations between age (as a dichotomous variable) and the EF composite score ( $r = -.61$ ,  $p < .0001$ ) on the one hand and verbal EM ( $r = -.50$ ,  $p < .0001$ ) on the other hand were observed, showing that both episodic memory and executive functions decrease with aging. Age was also significantly correlated both with the HOMES true memory measure ( $r = -.55$ ,  $p < .0001$ ) and the HOMES false memory measure ( $r = .42$ ,  $p < .01$ ). Also, higher subjective memory complaints were

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

associated with aging ( $r = .62, p < .0001$ ). Similarly, both the HOMES true and false memory measures were significantly correlated with EF and verbal EM. Only the HOMES true memory measure was significantly correlated with the self-reported memory complaints ( $r = -.31, p < .05$ ) indicating that low true memory performances are associated with higher memory complaints in everyday life. The correlations for age-related effects are presented in Table 3.

Partial correlations controlling for the effect of EF resulted in diminished correlations between a) age and the HOMES true memory score ( $r = -.25, p > .100$ ) and b) age and the HOMES false memory score ( $r = .28, p > .05$ ) (see Table 3).

Partial correlations controlling for EM also diminished the correlation between age and the HOMES true memory score but it still remained significant ( $r = -.40, p < .01$ ) while the correlation between age and the HOMES false memory score was no longer significant ( $r = .24, p > .100$ ).

Finally, controlling for QAM performances diminished the correlations of age with both the HOMES true memory score ( $r = -.48, p < .001$ ) and HOMES false memory score ( $r = .33, p < .05$ ) but still remained significant (see Table 3 for partial correlations).

In the AD group, only a significant and positive correlation between EM and the HOMES false memory score ( $r = .71, p < .01$ ), indicating that poor performances on episodic memory tasks are associated with higher proportions of false recognitions in AD patients.

-----

Insert Table 3

-----

## 4. Discussion

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

This study was driven by two main goals: first, we examined the memory processes for multiple objects in a more naturalistic testing situation in aging and AD. Second, we examined the contribution of executive functioning and verbal episodic memory to the HOMES-based performances in terms of true and false memory both in aging and in AD. A secondary goal was also to examine the relationship between self-reported memory complaints and age-related differences in the HOMES measures.

### *4.1. HOMES-based everyday memory in aging and AD*

In the present study, we replicated in part the memory profile of older adults (Constantinidou & Baker, 2002), showing their learning ability, preserved semantic clustering, and preserved recognition memory (Sauzéon, Claverie & N'Kaoua, 2006). However, the susceptibility of older adults to PI was lower than that of their younger counterparts, and they did not make significantly more false alarms compared with younger adults contrary to our expectations. The low magnitude of the age effect in PI may be due to several factors, such as a lack of sensitivity in list-learning paradigms compared to other well-known paradigms (e.g., AB-AC procedure, Ebert & Anderson, 2009), or a visual modality effect facilitating the source memory for objects in older adults (Constantinidou & Baker, 2002; Schacter & Addis 2007). Regarding an age effect on false recognitions provided by the HOMES test, the latter assumption is reinforced. Indeed, in spite of the superiority of source-based false recognitions over gist-based ones across the recognition test (previously demonstrated by Pierce et al., 2005), the difference between younger and older adults was not significant, which indicates that after repeated exposures to the virtual apartment, older adults probably learn to focus on distinctive features of objects and bind them with their context, thus enhancing their access to item-specific information and therefore their source-monitoring abilities (Thomas & Sommers, 2005), especially in a visually rich and complex environment



## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

(Hollingworth & Henderson, 2002; Gallo, Cotel, Moore & Schacter, 2007). To the degree that the events of people's lives are visually detailed, they are relatively distinctive, laboratory or clinical paper-pencil tasks that require the monitoring of non-distinctive events might thus overestimate the real consequences of aging on retrieval strategies based on item-specific information.

Compared to older adults, a different memory profile in AD patients emerged from the VR-based assessment with impairments on all of the following HOMES measures, thus replicating the well-known memory pattern of AD: learning, recognition accuracy, semantic clustering, PI, and increased susceptibility to false recognitions (Aronoff, Gonnerman, Almor, Arunachalam, Kempler, & Andersen, 2006; Budson et al., 2000; Multhaup, Balota, & Faust, 2003; Westerberg et al., in press). Our study extends this pattern to naturalistic situations using VR. Furthermore, important results are found regarding the type of false recognitions. As in Pierce et al.'s (2005) study, we reported higher proportions of source-based false recognitions but also higher susceptibility to gist-based false recognitions, as in studies using repeated exposures to to-be-learned material in AD patients (e.g., Abe et al., 2011). Overall, the present findings suggest that both item-specific (as suggested by low free recalls, low recognition, and higher susceptibility to source-based false recognitions) and relational processing (i.e., impaired semantic clustering and higher gist-based false recognitions) are impaired in AD patients, accounting for this specific memory profile in an everyday-like situation while older adults are only impaired on tasks needing item-specific processing (Pierce et al., 2008). Further studies are also needed to examine the differential diagnostic value of this AD profile, specifically regarding the contribution of false recognitions as an early indicator of the change in cognitive status (Hildebrandt, Haldenwanger, & Eling, 2009).

Taken together, the present results indicated that a more naturalistic assessment of memory, such as the HOMES test, tends to diminish age-related differences (i.e., quasi-

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

normal PI and false recognition susceptibility) without altering the capture of a specific memory profile in the early stages of AD.

### *4.2. Mechanisms of the HOMES true and false memory in aging and AD*

Concerning our second main goal, we showed that age-related effects in the HOMES true memory performances were only mediated by executive functioning. As expected, we also found a small but nonetheless significant contribution of executive functioning to false recognitions, although an appreciable amount of variance in the susceptibility to false recognitions was mainly accounted for by episodic memory. Our result regarding the contribution of executive functioning toward both the HOMES true and false memory performances is thus consistent with the literature on traditional paper-pencil tests of episodic memory (Troyer, Graves, & Cullum, 1994; Brooks, Weaver, Scalfia, 2006). One view considers that source monitoring deficits underlie false recognitions in older adults and are explained by an age-related decline in executive functioning and functional changes in the prefrontal cortex during effortful retrieval tasks (e.g., Dobbins, Foley, Schacter, & Wagner, 2002). In fact, according to this view, the prefrontal cortex is involved in control processes after each item has been recognized in order to evaluate if they belong to the source relevant to the task (i.e., source memory) but not in item memory. In line with this view, compared to younger adults, studies using words or pictures showed poorer performances in older adults in tasks needing source recollection but not in those involving item recollection (Old & Naveh-Benjamin, 2008). Interestingly, these source-monitoring deficits (retrieval failures) have also been associated with an under-recruitment of the prefrontal cortex (Rajah, Languay, & Valiquette, 2010) but retrieval success (absence of age differences) was associated with an age-related over-recruitment of this region (Spaniol & Grady, 2012), which is interpreted as a compensation mechanism to maintain a higher level of performance. The contribution of

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

executive functioning to both age-related true and false memories in the present study is consistent with this view. Furthermore, episodic memory also significantly mediated false recognitions, which mirrors studies showing a major contribution of episodic memory to false recognitions (Lövdén, 2003; Salthouse & Siedlecki, 2007) as well as recent neuroimaging findings relating source-based false memories to the hippocampus in older adults (Kukulja, Thiel, Wilms, Mirzazade, & Fink, 2009). This episodic account of false recognition is also confirmed by the positive and significant correlation between AD-related susceptibility to false memory and the episodic memory composite score in the present work, which is in accordance with reduced medial temporal lobe volumes in AD (Westerberg et al., in press). Considered together, the mediation of age differences in everyday-like memory performances by executive functioning and episodic memory measures is consistent with findings associating recollection with both the prefrontal cortex and medial temporal lobe activity (Woodruff, Johnson, Uncapher, & Rugg, 2005).

Furthermore, older adults complained more about their memory compared to younger adults, and therefore, the present study found a strong relationship between age and the SMC (subjective memory complaints) measured by the total QAM performance. These results are in line with previous studies reporting higher rates of SMCs among older adults (Amariglio et al., 2011). More interestingly, on the one hand, despite the significant correlation found between the self-reported complaints in older adults and the HOMES true memory performances, SMCs did not greatly mediate age-related effects in true memory. On the other hand, we did not find such correlations in AD patients, thus replicating the finding by Clément et al. (2008) who used the same questionnaire with AD patients. In older adults, the higher memory complaints benchmarked against the otherwise spared ability to learn and their equalized recognition performance suggest that this lack of mediation may be the result of a self-overestimation of age-related deficits. This kind of self-overestimation has been

previously pointed out and supposedly reflects age-related metacognitive deficits and/or an aging-related stereotype effect (e.g., Volz-Sidiropoulou & Gauggel, 2012). Although metacognition in mild-to-moderate AD is still not well understood, the absence of a correlation between SMCs and actual memory performances may be due both to the presence of confabulation (i.e., overestimation bias) in AD (La Corte, Serra, Attali, Boissé, & Dalla Barba, 2010) and anosognosia (i.e., underestimation bias) (Galeone et al., 2011). Therefore, SMC should be used with caution when making predictions about the cognitive status of older adults as it may prove unreliable.

### *4.3. Limits and Conclusion*

It is necessary to keep some limits to the present study in mind: First, the study used small samples and, thus, it would be interesting to reproduce the study with a bigger sample size and eventually rule out any potential inadequacy in power. Second, we only used one self-report to assess subjective memory complaints. Further studies are expected using a wider range of questionnaires and scales to assess subjective memory/cognitive complaints. This could be particularly interesting to assess to what extent the overestimation bias in older adults and confabulations in AD are related and if they make separate contributions to everyday-like memory functioning as assessed by the HOMES.

In summary, the VR-based assessment allowed us to replicate at least in part the memory profile of older adults while that of AD patients was fully replicated, with an additional susceptibility to higher gist-based false recognition under some conditions. We also showed that correct everyday-like memory performances in older adults are mainly mediated by executive functioning and both executive functioning and episodic memory deficits contribute to memory errors in older adults while memory errors are only related to episodic memory deficits in AD patients. These findings pinpoint the existence of different

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

mechanisms for true and false memory in aging and AD. Overall, as episodic memory impairment is the hallmark of AD, our findings also show that VR can capture episodic memory functioning in both aging and AD, and therefore can be used as a clinical tool benchmarked against traditional memory tests. Furthermore, administering the HOMES test took as long as the CVLT but it caused minimal unpleasant experience for the AD patients who were always able to say something about the visualization of the virtual apartment.

### References

- Abe, N., Fujii, T., Nishio, Y., Iizuka, O., Kanno, S., Kikuchi, H., ..., & Mori, E. (2011). False item recognition in Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 49 (7), 1897-1902.
- Alario, F.-X., & Ferrand, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for French: Names for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31, 531-552.
- Amariglio, R.E., Townsend, M.K., Grodstein, F., Sperling, R.A., & Renz, D.M. (2011). Specific Subjective Memory Complaints in older persons may indicate poor cognitive function. *Journal of the American Geriatric Society*, 59 (9), 1612-1617.
- Aronoff, J.M., Gonnerman, L.M., Almor, A., Arunachalam, S., Kempler, D., & Andersen, E.S. (2006). Information content versus relational knowledge: Semantic deficits in patients with Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 44 (1), 21-35.
- Baldo, J.V., Delis, D., Kramer, J., & Shimamura, A.P. (2002). Memory performance on the California Verbal Learning Test-II: Findings from patients with focal frontal lesions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, 539-546.
- Bousfield, W. (1953). The occurrence of clustering in the recall of randomly arranged associates. *Journal of General Psychology*, 49, 229-240.
- Braak, H., & Braak, E. (1991). Neuropathological staging of Alzheimer-related changes. *Acta Neuropathologica*, 82 (4), 239-259.
- Brandt, J., Shpritz B., Munro, C.A., Marsh, L., & Rosenblatt, A. (2005). Differential impairment of spatial location memory in Huntington's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 76 (11), 1516-1519.
- Braver, T.S., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F.I.M. Craik & T.A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (311-372). Hove: Psychology Press.
- Brooks, B.L., Weaver, L.E., Scalfia, C.T. (2006). Does impaired executive functioning differentially impact verbal memory measures in older adults with suspected dementia ? *The Clinical Neuropsychologist*, 20, 230-242.
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free recall performance. *Psychology and Aging*, 11, 3-9.
- Buckner, R.L., Koutstaal, W., Schacter, D.L., Dale, A.M., Rotte, M., & Rosen, B.R. (1998). Functional-anatomic study of episodic retrieval: II. Selecting averaging of event-related fMRI trials to test the retrieval success hypothesis. *NeuroImage*, 7 (3), 163-175.
- Budson, A.E., Daffner, K.R., Desikan, R., & Schacter, D.L. (2000). When false recognition is unopposed by true recognition: Gist-based memory distortion in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 14 (2), 277-287.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Calabria, C., Manenti, R., Rosini, S., Zanetti, O., Miniuni, C., & Cotelli, M. (2011). Objective and subjective memory impairment in elderly adults : a revised version of the Everyday Memory Questionnaire. *Aging Clinical and Experimental Research*, 23 (1), 67-73.

Clément, F., Belleville, S., & Gauthier, S. (2008). Cognitive complaint in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 14 (2), 222-232.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioural sciences*. Academic Press, New York.

Constantinidou, F., & Baker, S. (2002). Stimulus modality and verbal learning performance in normal aging. *Brain and Language*, 82, 296-311.

Conway, M.A. (2001). Sensory-perceptual episodic memory and its context: autobiographical memory. *Philosophical Transaction of the Royal Society, B: Biological Sciences*, 356 (1413), 1375-1384

Craik, F. I. M., & Mcdowd, J. M. (1987). Age Differences in Recall and Recognition. *Journal Of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 13, 473-479.

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334.

Delis, D.C., Massman, P.J., Butters, N., & Salmon, D.P. (1991). Profiles of demented and amnesic patients on the California verbal learning test: Implications for the assessment of memory disorders. *Psychological Assessment*, 3 (1), 19-26.

Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., & Ober, B.A. (2000). *California Verbal Learning Verbal Test: Adult version manual (2nd ed.)*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.

Dennis, N. A., Hayes, S. M., Prince, S. E., Madden, D. J., Huettel, S. A., & Cabeza, R. (2008). Effects of aging on the neural correlates of successful item and source memory encoding. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 34, 791-808.

Dobbins, I.G., Foley, H., Schacter, D.L., & Wagner, A.D. (2002). Executive control during episodic retrieval : Multiple prefrontal processes subserve source memory. *Neuron*, 35, 989-996.

Ebert, P.L., & Anderson, N.D. (2009). Memory interference in young adults, healthy older adults, and older adults with amnesic Mild Cognitive Impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(1), 83-93.

Ferrand, L., & Alario, X. (1998). Normes d'associations verbales pour 366 noms d'objets concrets. *L' Année Psychologique*, 98, 689-739

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Folstein MF, Folstein SE, & McHugh PR. (1975). 'Mini-Mental State': A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 189-198.

Galeone, F., Pappalardo, S., Chieffi, S., Iavarone, A., & Carlomagno, S. Anosognosia for memory deficit in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 26 (7), 695-701.

Gallo, D.A., Cotel, S.C., Moore, C.D., & Schacter, D.L. (2007) Aging can spare recollection-based retrieval monitoring: The importance of event distinctiveness. *Psychology and Aging*, 22, 209-213.

Guéguen, N. (2009). L'importance d'un effet: Méthodologie simple de détermination et d'évaluation de l' "effect size". *European Journal of Scientific Research*, 38, 20–25.

Greenaway, M.C., Lacritz, L.H., Binegar, D., Weiner, M.F., Lipton, A., Munro Cullum, C., (2006). Patterns of verbal memory performance in mild cognitive impairment, Alzheimer's disease, and normal aging. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 19, 79–84.

Hildebrandt, H., Haldenwanger, A., & Eling, P. (2009). False recognition helps to distinguish patients with Alzheimer's disease and amnesic MCI from patients with other kinds of dementia. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 28, 159-167.

Hollingworth, A., & Henderson, J. M. (2002). Accurate visual memory for previously attended objects in natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 113–136

Hollingworth, A. (2006). Visual memory for natural scenes: Evidence from change detection and visual search. *Visual cognition*, 14 (4/5/6/7/8), 781-807.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, R. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal Of Aviation Psychology*, 3, 203-320.

Keppel, G. & Underwood, B.J. (1962). Proactive inhibition in short-term retention of single items. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1 (3), 153-161.

Kessels, R.P., van Doormal, A., & Janzen, G. (2011). Landmark recognition in Alzheimer's dementia: Spared implicit memory for objects relevant for navigation. *PloSOne*, 6 (4), e18611. doi:10.1371/journal.pone.0018611.

Kukolja, J., Thiel, C.M., Whilms, M., Mirzazade, S., & Fink, G.R. (2009). Ageing-related changes of neural activity associated with spatial contextual memory. *Neurobiology of Aging*, 30 (4), 530-645.

La Corte, V., Serra, M., Attali, E., Boissé, M-F., & Dalla Barba, G. (2010). Confabulation in Alzheimer's disease and amnesia: A qualitative account and new taxonomy. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16, 967-974



## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Laczo, J., Andel, R., Vyhlánek, M., Vlček, K., Magerova, H., Varjassyova, A., ..., & Hort, J. (2010). Human analogue of the Morris Water Maze for testing subjects at risk of Alzheimer's disease. *Neurodegenerative Disorders*, 17 (1-3), 148-152.

Lekeu, F., Magis, D., Marique, P., Delbeuck, X., Bechet, S., Guillaume, B., ..., & Salmon, E. (2010). The California verbal learning test and other standard clinical neuropsychological tests to predict conversion from mild memory impairment to dementia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*. 32 (2), 164-173.

Lövdén, M. (2003). The episodic memory and inhibition accounts of age-related increases in false memories: A consistency check. *Journal of Memory and Language*, 49, 268–283.

McKhann, G., Drachman, D., Folstein, M., Katzman, M., & Price, D. (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*, 34, 285-297.

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

Multhaup, K.M., Balota, D.A., & Faust, M.E. (2003). Release from proactive interference in healthy older adults and in early stage Alzheimer's Disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9, 830-838.

Neisser, U. (1996). Remembering as doing. *Behavioural and Brain Sciences*, 19, 203-204

Old, S.R., & Naveh-Benjamin, M. (2008). Differential effects of age on item and associative measures of memory: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 23 (1), 104-118.

O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *Hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Clarendon Press.

Pierce, B.H., Sullivan, A. L., Schacter, D. L., & Budson, A. E. (2005). Comparing source-based and gist-based false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 19 (4), 411-419.

Pierce, B.H., Waring, J.D., Schacter, D.L., & Budson, A.E. (2008). Effects of distinctive encoding on source-based false recognition: Further examination of recall-to-reject processes in aging and Alzheimer's disease. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 21 (3), 179-186

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.

Poitrenaud, J., Deweer, B., Kalafat, M., & Van der Linden, M. (2007) *Adaptation en langue française du California Verbal Learning Test (French version of the California Verbal Learning Test)*, Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée, Paris, France, 2007.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Rajah, M.N., Languay, R., & Valiquette, L. (2010). Age-related changes in prefrontal cortex activity are associated with behavioural deficits in both temporal and spatial context memory retrieval in older adults. *Cortex*, 46 (4), 535-549.

Ranganath, C. (2010). A unified framework for the functional organization of the medial temporal lobes and the phenomenology of episodic memory. *Hippocampus*, 20, 1262-1290.

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) 207-239.

Royall, D.R., Chiodo, L.K., & Polk, M.J. (2004). Misclassification is likely in the assessment of mild cognitive impairment. *Neuroepidemiology*, 23 (4), 185-191.

Salthouse, T. A., & Siedlecki, K. L. (2007). An individual differences analysis of false recognition. *American Journal of Psychology*, 120, 429-458.

Sauzéon, H., Claverie, B., & N'Kaoua, B. (2006). Age differences in the organization and acquisition-forgetting process in a multiple free-recall trial task. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain, & Cognition*, 18, 1. Retrieved from <http://cpl.revues.org/index.1012.html>.

Sauzéon, H., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Déjos, M., Zheng, X., Guitton, P., & N'Kaoua, B. (2012). The use of virtual reality for episodic memory assessment: Effects of active navigation. *Experimental Psychology*, 59 (2), 99-108.

Schacter, D.L. & Addis, D.R. (2007). The cognitive neuroscience of constructive memory: Remembering the past and imagining the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society (B)*, 362, 773-786.

Scheltens, Ph., Leys, D., Barkhof, F., Huglo, D., Weinstein, H.C., Vermersh, P., ..., & Valk, J. (1992). Atrophy of medial temporal lobes on MRI in "probable" Alzheimer's disease and normal ageing: Diagnostic value and neuropsychological correlates. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 55, 967-972.

Shih, S.-I., Meadmore, K. L., & Liversedge, S. P. (2012). Aging, eye movements, and object-location memory. *PloS one*, 7(3), e33485. doi:10.1371/journal.pone.0033485

Simons, J.S., & Spiers, H.J. (2003). Prefrontal and medial temporal lobe interactions in long-term memory. *Nature reviews Neuroscience*, 4, 637-648.

Spaniol, J., & Grady, C. (2012). Aging and the neural correlates of source memory: Over-recruitment and functional reorganization. *Neurobiology of Aging*, 33 (2), 425.e3-425.18. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2010.10.005.

Stricker, J.L., Brown, G.G., Wixted, J., Baldo, J.V., & Delis, D.C. (2002). New semantic and serial clustering indices for the California verbal learning test-second edition: background, rationale, & formulae. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 8, 425-435.

Stroop J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Taillade, M., Sauzéon, H., D jos, M., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., ..., & N'Kaoua, B. (2012). Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application. *Aging, Neuropsychology, Cognition*, 20 (3), 298-319.

Thomas, A.K., & Sommers, M.S. (2005). Attention to item-specific processing eliminates age effects in false memories. *Journal of Memory and Language*, 52, 71-86.

Troyer, A. K., Graves, R. E., & Cullum, C. M. (1994). Executive functioning as a mediator of the relationship between age and episodic memory in healthy aging. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 1, 45-53.

Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual review of Psychology*, 53, 1-45.

Vanderberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47, 599-601.

Vandierendonck, A., Kemps, E., Fastame, M. C., & Szmalec, A. (2004). Working memory components of the Corsi blocks task. *British Journal of Psychology*, 95, 57-79.

Vendrell, P., Junqué, C., Pujol, J., Jurado, M.A., Molet, J., & Grafman, J. (1995). The role of prefrontal regions in the Stroop task. *Neuropsychologia*, 33 (3), 341-362.

Volz-Sidiropoulou, E., & Gauggel, S. (2012). Do subjective measures of attention and memory predict actual performance? Metacognition in older couples. *Psychology and Aging*, Vol 27(2), 440-450.

Watson, H.C., Wilding, E.L., & Graham, K.S. (2012). A role for perirhinal cortex in memory for novel object-context associations. *Journal of Neuroscience*, 32 (13), 4473-4481.

Wechsler D. (1997). *Wechsler Memory Scale-III*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.

Westerberg, C., Mayes, A., Florczak, S.M., Chen, Y., Creery, J., Parrish, T., ..., & Paller, K.A. (in press). Distinct medial temporal contributions to different form of recognition in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.06.025>

Wiedmann, C.N., Beinhoff, U., & Riepe, M.W. (2012). Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, 33 (2), 297-303.

Wolk, D.A., Dickerson, B.C., and Alzheimer's disease Neuroimaging Initiative. (2011). Fractionating verbal episodic memory in Alzheimer's disease. *NeuroImage*, 54, 1530-1539.

Woodruff, C. C., Johnson, J. D., Uncapher, M. R., & Rugg, M. D. (2005). Content-specificity of the neural correlates of recollection. *Neuropsychologia*, 43 (7), 1022-1032.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Yakushev, I., Müller, M.J., Lorscheider, M., Schermuly, I., Weibrich, C., Dellani, P.R., ..., & Fellgiebel, A. (2010). Increased hippocampal head diffusivity predicts episodic memory performance in early Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 48 (5), 1447-1453.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Table 1. Means and standard deviations for the participants' demographic characteristics and their neuropsychological performances

variables	Younger (n = 23)	Older (n = 23)	AD (n = 16)	ANOVAs F (2, 59)
Age (years)	22.20 (1.68)	73.60 <sup>a</sup> (9.10)	78.63 <sup>b</sup> (1.97)	435.07****
Education level (years)	14.26 (1.36)	13.35 (2.96)	11.19 (4.78)	4.65*
Gender (male/female)	14/9	14/9	8/8	
Experience with NT	12.87 (5.27)	6.39 (4.64)	2.00 (3.67)	3.37***
SSQ-TS	6.34 (10.11)	11.71 (21.79)	16.13 (10.17)	-0.45
MMSE	- -	28.96 (1.43)	21.62 (4.32)	-
QAM total	17.17 (3.43)	23.48 <sup>a</sup> (4.71)	29.94 <sup>b,c</sup> (11.63)	16.51****
Mental Rotation	20.27 (8.31)	9.83 <sup>a</sup> (6.66)	5.02 <sup>c</sup> (2.89)	27.53****
Backward spatial span	8.35 (1.99)	6.48 <sup>a</sup> (2.00)	4.31 <sup>b,c</sup> (2.12)	18.78****
Stroop errors	0.09 (0.42)	1.65 (1.30)	19.68 <sup>b,c</sup> (28.44)	10.24***
CVLT FR total 1-5	61.87 (7.20)	52.56 <sup>a</sup> (9.04)	24.38 <sup>b,c</sup> (14.62)	66.26****
CVLT Recognition	15.52 (0.73)	14.70 (1.63)	13.38 <sup>b,c</sup> (2.34)	8.43***

Note. \*p < .05; \*\*\*p < .001; \*\*\*\*p < .0001. CVLT FR total 1-5 = total CVLT free recalls for trials 1 to 5; NT = New Technology

<sup>a</sup> Scores showing difference in older adults compared to the matched younger group (p < .05)

<sup>b</sup> Scores showing difference in AD patients compared to the older group (p < .05)

<sup>c</sup> Scores showing difference in AD patients compared to the younger group (p < .05)

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Table 2. *Performances of the younger and older adults on the HOMES test.*

Memory indices	Younger		Older		AD	
	M	SD	M	SD	M	SD
<i>Learning (version A)<sup>a</sup></i>						
Trial 1	.73	.16	.55	.15	.18	.11
Trial 2	.85	.11	.68	.16	.22	.15
<i>PI<sup>a</sup></i>						
Trial 1 (version A)	.73	.16	.55	.15	.18	.11
Trial 1 (version B)	.62	.18	.51	.16	.17	.17
<i>Semantic clustering (version A)</i>						
LBC Trial 1	15.32	7.37	15.92	5.69	2.89	2.50
LBC Trial 2	21.38	6.95	21.73	7.73	3.71	4.05
<i>Retrieval</i>						
Free recall trial 2	.85	.11	.68	.16	.22	.15
Recognition hits	.91	.07	.79	.11	.60	.20
<i>False recognitions</i>						
Source-based lures	.18	.14	.30	.23	.54	.30
Gist-based lures	.04	.06	.13	.13	.41	.28

*Note.* <sup>a</sup> Proportions of correct free recalls.

## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

Table 3. Correlations performed for the younger and older subjects: i) the top part shows the Pearson correlations between age, neuropsychological measures, HOMES measures and QAM; and the bottom part shows the correlations between age and the HOMES measures and subjective memory complaints controlled for EF, EM, and QAM.

variables		1	2	3	4	5	6
EF	(1)	-					
EM	(2)	<b>.41**</b>	-				
QAM	(3)	-.28	<b>-.50****</b>	-			
HOMES true memory	(4)	<b>.66****</b>	<b>.49***</b>	<b>-.31*</b>	-		
HOMES false memory	(5)	<b>-.34*</b>	<b>-.46****</b>	.27	<b>-.54****</b>	-	
Age	(6)	<b>-.61****</b>	<b>-.50****</b>	<b>.62****</b>	<b>-.55****</b>	<b>.42***</b>	-
<i>Age correlations controlling for</i>		EF	EM	QAM			
Age * HOMES true memory		-.25	<b>-.40**</b>	<b>-.48****</b>			
Age * HOMES false memory		.28	.24	<b>.33*</b>			

Note: \* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ , \*\*\* $p < .001$ , \*\*\*\* $p < .0001$ ; EF = executive functioning; EM = episodic memory; QAM = Questionnaire d'Auto-évaluation de la Mémoire (Memory Self-Evaluation questionnaire).

# AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

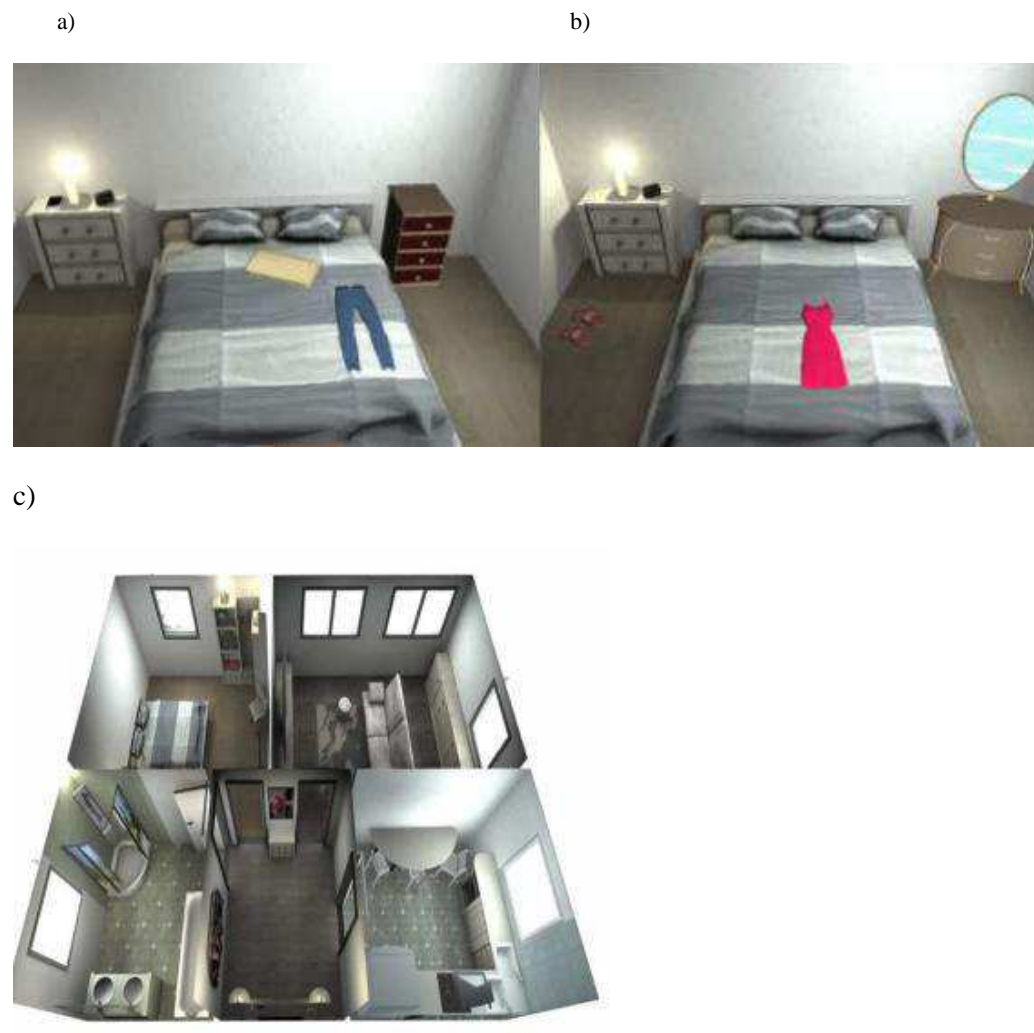


Figure 1. The HOMES virtual apartment. a) A view of the bedroom taken from version A. b) A view of the bedroom taken from version B. c) A bird's-eye view of the virtual apartment.



## AGING, ALZHEIMER'S DISEASE AND EVERYDAY-LIKE MEMORY

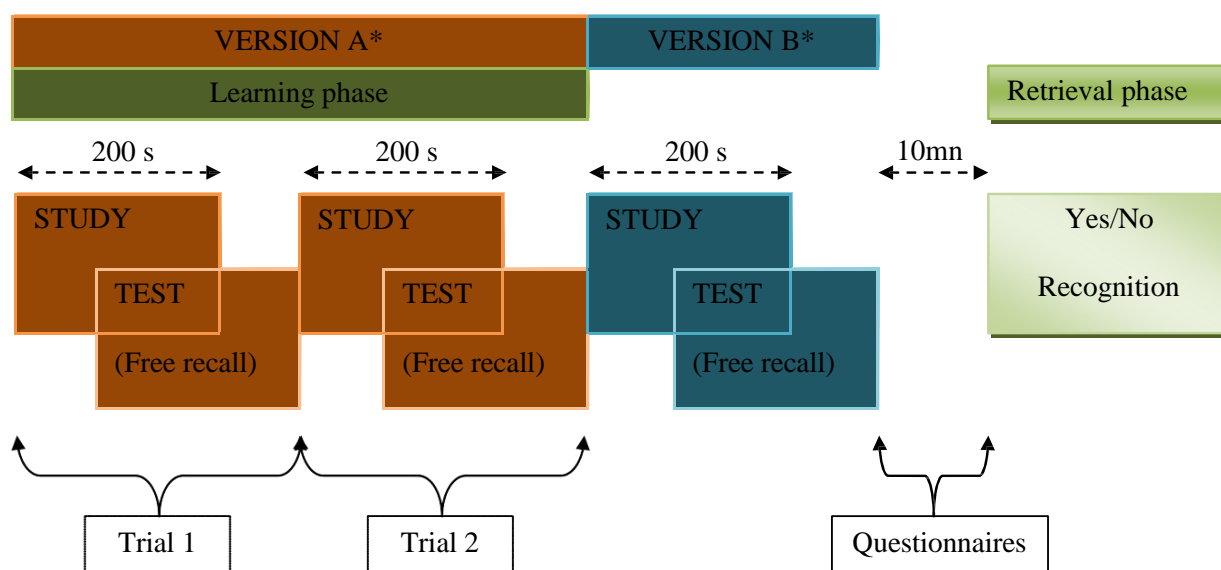


Figure 2. Task design. During the learning phase, each study of the target version (version A) lasted 200 seconds and was immediately followed by a free recall task. Participants had to complete the NT and SSQ questionnaires during the 10 min. interval between the last free recall task of version B and the final retrieval phase. \*Versions A and B were counterbalanced across the participants such that one version was presented as version A for half of the participants and the other version as version A for the other half in each age group.

## Appendix

*Appendix 1-* Lists of objects studied in the apartments (French words are translated into English).

Categories	Objects only viewed in Version A	Objects only viewed in Version B	Objects viewed in both versions	Source-based lures (version A)*	Source-based lures (Version B)*	Gist-based lures
<b>Bedroom</b>						
	Wardrobe	Dressing table	Bed	Dressing table	Wardrobe	Library
	Blanket	Slippers	Sheet	Slippers	Pant	Pyjama
	Pant	Robe	Alarm radio			
	Night table	Cradle	Lamp			
	Book	Hanger	Pillow			
<b>Bathroom</b>						
	Gloves	Soap	Toothbrush	Soap	Gloves	Toothpaste
	Basin	Sponge	Bath sink	Brush	Towel	Gown
	Comb	Brush	Mirror			
	Towel	Razor	Shower			
	Shampoo	Hairdryer	Bathtub			
<b>Kitchen</b>						
	Saucepan	Stew	Oven	Stew	Saucepan	Spoon
	Fork	Knife	Fridge	Knife	Bowl	Kitchen Stool
	Plate	Ladle	Kitchen sink			
	Eggs	Bread	Table			
	Bowl	Glass	Chair			
<b>Living room</b>						
	Pedestal table	Armchair	Couch	Armchair	Pendulum	Desk
	Doily	Painting	Cushion	Showcase	Low table	Candlestick

Pendulum clock	Showcase	Television
Low table	Pouffe	TV Stand
Ashtray	Vase	Carpet

---

\* The target version is indicated in parenthesis.

## *Appendix 2- Neuropsychological tests*

*-Corsi's block tapping task.* The Corsi material consists of a set of nine identical blocks located on a wooden board. The task is administered in two parts. For the first part, the experimenter points to a series of blocks at a rate of one block per second. After each series, the participant has to point to the same blocks in the same order. The length of blocks increases gradually every two series and the first part stops when the participant makes two consecutive errors. One point is given if he/she successfully recalls each block in the correct order for one series (maximum score = 12). The second part starts in a similar manner; however, this time the participant is required to recall the series by inverting the order of the presentation. Therefore, once the experimenter finishes pointing to the blocks, the participant begins by pointing to the last block. One point is given for a correct answer (maximum score = 12). We only selected the score obtained on this second part as the dependent measure for the backward spatial span.

*-Mental rotation task.* Participants had to complete the mental rotation test in two parts. Each part, completed in 3 minutes, was comprised of 10 items, with five items each on two different pages. Each item consists of five geometrical figures among which the first one in the left-most location is the target that participants have to find among four following response-choices. These four choices are comprised of two correctly rotated figures and two foils. Two points were given when the subjects correctly identified the two targets among the four possible choices, 1 point was given if a participant gave only one correct answer out of the four possible, and 0 points were given if he/she gave either one correct and one incorrect answer, two incorrect answers or no answer at all. The total of correctly identified items among the four possible choices were then scored as the dependent variable (max. score = 40)

*-Stroop test.* The Stroop test consists of three sheets of papers representing three subtasks. Color names are printed in black ink in the first sheet, colored rectangles are printed in the

second sheet, and a word-color sheet consisting of color names printed in non-matching colors. For each sheet, participants have to read the printed words (for the first sheet) or name the colors (for the two other sheets) as quickly as possible. For the third sheet however, participants have to ignore the meaning of the word while naming the color in which the words are printed (e.g., say “blue” for the word *red*). Response times are measured along with the number of errors they make on each subtask. However, only errors were taken as a measure of response inhibition in the present study (Vendrell, Junqué, Pujol, Jurado, Molet, & Grafman, 1995).

### III. Résumé du chapitre V.

Dans les deux études, en implémentant le paradigme d'apprentissage par rappel libres multi-essais au sein d'un dispositif RV, nous avons montré:

- *Concernant les effets de l'âge (sur les études 1 et 2) :*
  - Une diminution des performances de rappel libre, une sensibilité accrue aux fausses reconnaissances, un bénéfice augmenté de la reconnaissance comparé au rappel amenant à une quasi-normalisation de la performance, et une préservation de la capacité d'apprentissage tout comme de la capacité à utiliser une stratégie d'encodage telle que le regroupement sémantique ;
  - Par contre, la sensibilité à l'interférence proactive n'est pas retrouvée ;
  - Les effets négatifs de l'âge rapportés dans nos études sont majoritairement médiés par les difficultés exécutives et secondairement par les difficultés de mémoire épisodique.
  
- *Concernant les jeunes adultes avec TC modéré à sévère (étude 1) :*
  - Un pattern de résultats similaire à celui des personnes âgées est rapportés ;
  - Les déficits observés chez les patients sont principalement rapportés comme médiés par leurs difficultés de mémoire épisodique.
  
- *Concernant les patients avec MA en stade léger à modéré (étude 2) :*
  - Comparés aux âgés, il est constaté un appauvrissement des performances de rappel libres associé à une capacité d'apprentissage déficitaire, une sensibilité accrue aux fausses reconnaissances, une disparition anormale de l'effet d'interférence proactive, une déficience dans les stratégies de catégorisation sémantique mises en jeu à l'encodage, un bénéfice augmenté de la reconnaissance sans normalisation de la performance
  - Une médiation par la mémoire épisodique ou le fonctionnement exécutif n'est pas retrouvée comme possible origine des difficultés observées excepté pour les fausses reconnaissances où une médiation par la mémoire épisodique est constatée.

Au total, les effets du vieillissement classiquement observés au moyen des tests traditionnels ou des procédures de laboratoire sont globalement répliqués à l'aide du HOMES test, et ceci à travers les deux études suggérant une bonne validité de construit au HOMES test. Cette validité de construit est renforcée par la mise en évidence d'un profil mnésique des âgés distinct de la maladie d'Alzheimer mais similaire au traumatisme crânien, répliquant ainsi les

données de la littérature telles que rapportés par exemple à l'aide du CVLT (e.g., Delis et al., 2000 ; Lekeu et al., 2009 ; XXX). Ces résultats confortent l'idée que la RV est un outil fiable d'évaluation neuropsychologique de la mémoire épisodique dans son versant quotidien.

L'étude des effets de médiation par la mémoire épisodique et le fonctionnement exécutif met en évidence une origine plutôt exécutivo-mnésique dans les cas du profil des âgés et une origine plutôt mnésique dans le cas des patients avec TC malgré un profil mnésique identique à celui des âgés. Du côté des patients avec MA, nous n'observons pas d'effets de médiation consistants. L'ensemble de ces résultats sera discuté en profondeur dans le *chapitre VII*.

## Chapitre VI

### *Effet de la navigation active et de l'âge sur la mémoire quotidienne*

Ce chapitre rassemble deux autres études sous formes d'articles (publiés ou soumis) mises en place afin d'investiguer l'effet d'une navigation active en réalité virtuelle comparée à une navigation passive, aussi bien chez les jeunes (étude 3) que chez les âgés (étude 4).

**I. The use of virtual reality for episodic memory assessment: effects of active navigation** (*L'utilisation de la réalité virtuelle pour l'évaluation de la mémoire épisodique: effets de la navigation active*). **Publié dans** *Experimental Psychology*, 59 (2), 99-108.



# The Use of Virtual Reality for Episodic Memory Assessment

## Effects of Active Navigation

Hélène Sauzéron,<sup>1</sup> Prashant Arvind Pala,<sup>1</sup> Florian Larrue,<sup>1</sup> Gregory Wallet,<sup>1</sup>  
Marie Déjos,<sup>1</sup> Xia Zheng,<sup>1</sup> Pascal Guitton,<sup>2</sup> and Bernard N'Kaoua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Bordeaux 2, Laboratoire EA 487 Cognition et Facteurs Humains, Bordeaux, Aquitaine, France, <sup>2</sup>University of Bordeaux 1 and INRA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, France

**Abstract.** Episodic memory was assessed using Virtual Reality (VR). Forty-four (44) subjects visualized a target virtual apartment containing specific objects in each room. Then they visualized a second virtual apartment comprised of specific objects and objects shared by the two apartments. Subjects navigated in the virtual apartments in one of the following two conditions: active and passive. Four main episodic memory components were scored from the VR exposures: (1) learning effect; (2) active forgetting effect; (3) strategies at encoding and at retrieval; and (4) false recognitions (FRs). The effect of navigation mode (active vs. passive) on each memory component was examined. Active subjects had better learning and retrieval (recognition hits) performances compared to passive subjects. A beneficial effect of active navigation was also observed on the source-based FR rates. Active subjects made fewer source-based FRs compared to passive subjects. These overall results for the effect of active navigation are discussed in terms of the distinction between item-specific and relational processing.

**Keywords:** episodic memory, assessment, virtual reality, active navigation

Virtual Reality (VR) is gaining popularity as a tool in cognitive psychology and neuropsychology because it enables researchers and clinicians to create situations that are close to daily life with experimental control. Specific cognitive functions are being addressed with the VR technology such as memory, given its clinical value for neuropsychological diagnoses as well as predictions of daily life difficulties exhibited by patients (e.g., Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2004; Burgess, Maguire, & O'Keefe, 2002; Burgess, Maguire, Spiers, & O'Keefe, 2001; Matheis et al., 2007; Moffat & Resnick, 2002; Parslow et al., 2005; Parson & Rizzo, 2008). Because, in the virtual world, the person perceives and acts physically through sensory and motor interfaces, VR technology is also seen as a promising tool for providing insights into the relationships between sensorimotor and cognitive functioning (for a review, see Schultheis & Rizzo, 2001). The main focus of studies using VR is the spatial aspect of memory rather than the memory of objects from complex episodes (e.g., Aguirre & D'Esposito, 1997; Fields & Shelton, 2006; Tlauka, Keage, & Clark, 2005; Weniger, Ruhleder, Wolf, Lange, & Irle, 2009). Thus, this study focused on object memory. The aims of this study were to investigate robust laboratory-based memory effects that provide clinically-relevant information relative to learning, proactive interference, strategic processing, and FR, and to study the possible influence of sensorimotor activity on these effects.

Episodic memory is essential to effectively perform numerous everyday life activities. It enables human beings to consciously recall past experiences along with their spatial and temporal contexts (Tulving, 2002). An episodic memory trace is defined as the binding of the content and context of an event, including the integration of sensorimotor (i.e., visual, tactile, and auditory information), emotional as well as idiosyncratic aspects of that event. From the point of view of a clinical and neuropsychological assessment, an episodic memory task typically follows a two-step design (for a review, see Deluca & Chiaravalloti, 2004). First, during the study phase, a to-be-learned material is presented to the subject, often with an instruction to intentionally memorize it (because it can be difficult to measure recall when encoding is not controlled, like in incidental procedures). Second, at the test phase, the subject is asked to remember the studied material during a free recall, cued recall, or even a yes/no recognition task. Several paper-and-pencil-based memory tests are built up following this procedure such as the renowned California Verbal Learning Test (CVLT) (Delis, Kramer, Kaplan, & Ober, 2000) which analytically assesses episodic memory functioning by providing measures of learning, forgetting, strategic processing, or FR. *Learning processes* in the CVLT are measured across multiple free recall trials with the expected result of a progressive increase in performances across the trials (Sauzéron, Claverie, & N'Kaoua, 2006). *Forgetting processes* in the

CVLT, such as proactive interference (PI), which is defined as the detrimental effect of prior learning on the retrieval of subsequently learned information (Keppel & Underwood, 1962), are often assessed using two study lists where list A is expected to decrease performances on the free recall of the subsequent list B. *Strategic processing* involves a particular set of self-initiated, goal-directed, and controlled memory processes that are elicited during the encoding and/or retrieval of past experienced events in order to perform in the most accurate manner possible ( Craik, 1983; Moscovitch & Winocur, 2002; Schneider & Shiffrin, 1977). *Strategic processes* during encoding are assessed in the CVLT in terms of the organization of information by semantic category: since the words from the lists are semantically related, dividing the material into smaller and more manageable units (clusters) is the best way to improve memory performance on a categorized word list (Craik, 1983; Sauzéon, et al., 2006). Strategic retrieval is often assessed by different test conditions. For example, recall tasks that require the development of a retrieval plan are compared to a yes/no recognition task, which is expected to lead to higher performances since, during recognition, the target items themselves are the most distinctive retrieval cues (Mangels, Gershberg, Shimamura, & Knight, 1996; Moscovitch, 1989). Finally, FRs occur when individuals report memories of past events that did not happen at all or were different from the way in which they were remembered (Langevin, Sauzéon, Tacconat, & N' Kaoua, 2009; Schacter, 1999). Two types of FRs are assessed in the CVLT: *source-based* FR and *gist-based* FR (Johnson, Hashtroudi, & Lindsay, 1993). *Source-based* FR refers to subjects confusing two sources of real events (e.g., or confusing two lists of words learned in separate study phases) whereas *gist-based* FR refers to confusions between perceived and imagined associative memories, as is usually the case when lure items that were never presented during encoding phase but are semantically related to studied items are falsely recognized (Roediger & McDermott, 1995; for a review, see Gallo, 2006).

Very few VR-based studies have addressed object memory with respect to memory effects stressed in neuropsychological assessments. Parson and Rizzo (2008) designed an experimental VR-based object memory and learning test (the *Virtual Reality Cognitive Performance Assessment Test*) during which participants had to learn 50 pieces of language-based information without any context across three free recall trials as a learning measure. Subsequently, they navigated through five zones of a virtual city and for each one, two target items were presented again (i.e., items from the learning phase). Then the participants performed a delayed free recall task. Similarly, Matheis and his collaborators (2007) immersed traumatic brain-injured participants and healthy controls within a VR Office, a 3-D virtual environment (VE) programmed to resemble a common work office, and then all the participants performed an open-trial, list-learning memory test in which exposure trials (learning phase) to the VR Office were followed by short delay (30 min) and long delay (24 hrs) recalls and a yes/no recognition task to measure the passive forgetting processes (short

delay recall vs. long delay recall) and memory strategies implemented at retrieval (free recall vs. recognition). Concerning false memory processes, only three works used a VR application to study FRs and reported that FRs induced in VR are nearly similar to those induced in the real world. This was separately demonstrated for source-based FR (Hoffman, Garcia-Palacios, Thomas, & Schmidt, 2001; Segovia & Bailenson, 2009) and for gist-based FR (Flannery & Walles, 2003).

With respect to the literature on VR-based memory, no study has simultaneously examined the useful clinical information on learning, memory strategies at both encoding and retrieval, active forgetting (PI effect), and false memory processes as classically provided by the clinical assessment of episodic memory (e.g., the CVLT) to describe the different cognitive impairment patterns characterizing neurological pathologies. Consequently, the scope of the potential clinical applications is often limited to one or a few aspects of memory in daily life functioning.

Motor information processing has been shown to promote episodic memory, typically in paradigms like Subject-Performed Tasks (SPTs). The SPT paradigm has shown, for instance, that memory performances increase when motor activity is highly involved. Subjects performing actions outperform those who verbally (verbal task) memorize actions (Engelkamp & Dehn, 2000; Engelkamp, Zimmer, Mohr, & Sellen, 1994). SPTs may be encoded more automatically or in a more elaborative form, with multimodal components that include conceptual, visual, sensory, and motor components (see Engelkamp & Zimmer, 1994). According to Engelkamp and collaborators, the enhancement of episodic memory by motor activity is best described in light of the distinction between item-specific versus relational processing (Hunt & Einstein, 1981). Item-specific processing considers the distinctive features (i.e., item-*car*; specificity-*red*) of items whereas relational processing refers to general features of the object (such as their gist or semantic associates; i.e., item-*car*; gist-*vehicle*). In fact, the enactment condition increases item-specific measures such as recognition compared to recall but does not have an effect on relational measures such as clustering indicators (Engelkamp & Zimmer, 1994, 2002; Peterson & Mulligan, 2010; von Essen, 2005). By contrast, for measures depending on both processes, such as recall tests, an enactment effect is found (Engelkamp & Zimmer, 1994; Kormi-Nouri, 1995; Peterson & Mulligan, 2010; von Essen, 2005), but has been also demonstrated to be experimental design-dependent (e.g., short vs. long lists or between- vs. within-participant designs; Engelkamp & Dehn, 2000; Engelkamp & Zimmer, 1997; McDaniel, Dornburg, & Guynn, 2005).

Although sensorimotor activity may be symbolically involved during navigation in VEs, this navigation may be considered as an SPT (Brooks, Attree, Rose, Clifford, & Leadbetter, 1999). Thus, if activity modulates memory mechanisms, then it must be objectively taken into account in a VR-based assessment of memory. Results from the literature on VR-based assessments of memory are inconsistent if we consider active navigation (i.e., coupling control of motor skills with visual processing during environmental

exploration) as an SPT condition (compared to passive navigation, where the participant is only a VE observer without any executive motor control over his or her environmental exploration). Some studies show a positive effect of active navigation (Hahm et al., 2007; James, Humphrey, & Goodale, 2001; James et al., 2002; Péruch, Vercher, & Gautier, 1995; Péruch & Wilson, 2004; Wallet et al., 2011; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, & N' Kaoua, 2009) while others do not show such an effect (Gaunet, Vidal, Kemeny, & Berthoz, 2001; Wilson, 1999; Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997). But once again, most studies address the active navigation issue in order to investigate its influence on spatial memory. Interestingly, among the limited research on object memory, the findings are inconsistent but may be understood in terms of the influence of item-specific versus relational information. Hahm et al. (2007) showed that actively navigating participants had higher rates of hit responses and fewer miss responses compared to passive subjects. Similarly, James et al. (2001, 2002) showed that recognition performances on 3D object recognition tasks were better after actively manipulating them compared to learning them passively. Thus, as in SPT studies, a positive navigation effect is found when an item-specific measure (i.e., recognition) is used. By contrast, studies using free recall tasks influenced by both item-specific and relational information failed to show any beneficial effect of active navigation (Brooks et al., 1999), or even a detrimental effect (Pugnetti et al., 1998). As noted by Brooks et al. (1999), these two latter studies used an incidental learning procedure and the object discovery in VE was a secondary task for the active participants because they were mostly engaged in finding a route through the VE. Consequently, the navigation effect on virtual object memory was not really investigated, which limits any conclusion in terms of the effect of SPT on object memory according to the distinction between item-specific versus relational information.

Thus, from the overall data, there were two objectives in the present study, which was based on a 3D simulated apartment including objects. First, we aimed to establish that VR technology is able to provide an object memory assessment in terms of clinically-relevant main memory mechanisms such as learning, proactive interference, strategic processing, and FR. Second, we studied the differences between active and passive navigation on measures of these memory mechanisms according to the distinction between item-specific versus relational processing, with the assumption that item-specific memory measures such as recognition scores should be more sensitive to the navigation effect compared to relational measures such as clustering scores.

## Method

### Participants

Forty-four young participants (21 males and 23 females, mean age = 21.94 years,  $SD = 2.13$ ) were randomly divided into two groups: active and passive conditions. All the participants were volunteer students at the University of Bordeaux 2 and were generally healthy and without any visual, neurological, or psychiatric disorders. They had to complete a French version of the SSQ which measured the severity of sickness induced by 3D simulators (e.g., virtual reality). This questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered into 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 scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy, Lane, Berbaum, and Lilienthal (1993). Participants also had to rate their New Technology experience (Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001) with computers, computer games, and games involving VE; each of these three items was rated from 0 to 7 (the maximum score was 21 for each participant). There were no significant intergroup differences in age,  $t(42) = 0.45, p > .600$ , education level,  $t(42) = 0.42, p > .600$ , computer experience level,  $t(42) = -1.62, p > .100$ , and simulator sickness scores,  $t(42) = -1.34, p > .100$ . The characteristics of the subjects for each group are presented in Table 1.

### Materials and Procedure

The VE was viewed using a F1 + overhead video projector on a 2 × 1.88 m large apartment screen fixed to the wall. We used a Dell © processor (3 GHz, 5 Gbytes in RAM) and an NVidia © Quadro FX 4400 graphic card to generate a virtual apartment built using the Virtools © software. The participants sat 2 m away from the display screen in a dark silent room in order to visualize the VE projected in front of them. Each participant visualized two versions (versions A and B) of a virtual apartment presented during the testing (Figure 1) and consisting of 20 common objects and 20 objects that were specific to each apartment. There were four categories (a bedroom (Figure 2), a bathroom, a kitchen, and a sitting-room) and each category contained five of these objects. In selecting the objects, use was made of

**Table 1.** Subject characteristics in the active and passive conditions (the standard deviations are shown in parentheses)

Navigation mode	N	Sex	Education	Age	Computer level	SSQ
Active	22	10F/12M	14.64 (2.14)	22.1 (2.06)	12.86 (5.13)	1.09 (1.87)
Passive	22	11F/11M	14.46 (1.97)	21.8 (2.23)	15.27 (4.71)	2.00 (2.58)



Figure 1. A bird's-eye view of the virtual apartment.



Figure 2. The bedroom.

the association norms, as given by Lieury, Iff, and Duris (1976), and object frequency norms (Alario & Ferrand, 1999). The objects in the two versions were equivalent.

Active participants freely explored each room for 50 s by manipulating a keyboard (arrow keys) to move and a mouse for 360° panoramic visual scanning, while passive participants watched a 50-s long prerecorded dynamic visual scanning of each room. Participants could not go beyond the virtual walls. Each participant undergoing this VR-based memory testing first watched a target version of the apartment (called version A) which was presented twice (Trials 1 and 2) and a free-recall task immediately followed each presentation. Then he/she visualized the other version of the apartment (called version B) also followed by an immediate free-recall task. Before each visualization started, the experimenter gave the following instruction to the participants: 'Carefully look at everything in the apartment because you will have to immediately recall all the objects that you just saw.' For half of the participants in each navigation condition, the presentation of the two versions was counterbalanced (for the other half of the participants, the other version became the target version in that case). Immediately after the last recall task, the participants had to fill in the SSQ

and their level of computer experience was also assessed during a 10-min interval. After that 10-min delay, the participants were given a recognition task.

During this final verbal 'yes/no' recognition task, 40 target items and 16 distracters were presented in random order. Among the targets, 20 items were specific to the target version (version A) and 20 were common to both versions (i.e., studied during the visualization of both versions). Among the distracters, eight items were specific to version B; the eight remaining items were unstudied items considered as critical lures (they were not presented during the encoding phase but were semantically related to the target items and had similar constructions in terms of associative norms criteria). For each item, participants decided in a first step whether or not the item had been presented in the target version (version A) of the apartment. Thus, if a lure specific to version B was recognized as a target, the subject made a source-based FR; if a critical lure was recognized as a target, it was considered as a gist-based FR.

From this overall procedure inspired from the CVLT (Delis et al., 2000), the effect of active/passive navigation was investigated in terms of: (1) the learning effect with the comparison of the free recall scores between Trial 1 and Trial 2 for version A of the apartment; (2) the effects of memory strategies at encoding (comparison between the semantic clustering scores from Trial 1 and Trial 2 of the free recall task) and at retrieval (score comparison between Trial 2 of the free recall task and the recognition test); (3) PI effect by comparing the free recall scores obtained in Trial 1 for version A and version B of the apartment, and finally (4) FR effect by comparing gist-FR and source-based FR. The scoring of free recall and semantic clustering was carried out as in the CVLT (Delis et al., 2000): Free recall was calculated by giving 1 point each time a subject recalled a correct item and was calculated as the mean percentage of objects correctly recalled; and an observed semantic clustering was calculated by giving 1 point each time two objects recalled in an adjacent position belonged to the same semantic category. In addition, the Adjusted-Ratio-of-Clustering (ARC) score (Roenker, Thompson, & Brown, 1971) was also calculated, which has a value of 0 for chance level clustering, positive values for above chance clustering, and a value of 1 for perfect clustering.

## Results

A two-way mixed ANOVA was conducted with navigation mode (active vs. passive) as the between-subject factor and each of the four VR-based memory indicators as the within-subject factor. These data are presented in Table 2.

### VR-Based Learning Effect

The 2 (navigation: active vs. passive)  $\cdot$  2 (recall trials for version A of the apartment: Trial 1 vs. 2) mixed ANOVA performed with the correct mean proportion of recall as the dependant variable revealed a significant main effect

**Table 2.** Mean performances for each memory measure as a function of the navigation mode (active and passive)

Memory measures		Navigation mode	
		Active	Passive
Learning	Trial 1	.71 (.15)	.61 (.18)
	Trial 2	.87 (.08)	.80 (.12)
Active forgetting	Trial 1	.71 (.15)	.61 (.18)
	Version B	.34 (.04)	.34 (.07)
Encoding strategy	Trial 1	.46 (.15)	.48 (.25)
	Trial 2	.70 (.18)	.70 (.22)
CVLT clustering	Trial 1	.65 (.18)	.69 (.22)
	Trial 2	.79 (.15)	.78 (.14)
ARC scores	Free recall (Trial 2)	.87 (.08)	.80 (.12)
	Recognition hits	.93 (.05)	.90 (.08)
Retrieval strategy	Source-based	.19 (.21)	.33 (.22)
	Gist-based	.09 (.12)	.07 (.07)
False recognitions			

of learning,  $F(1, 42) = 75.85$ ,  $p < .0001$ , and a significant effect of navigation,  $F(1, 42) = 4.955$ ,  $p < .05$ . The performances increased from Trial 1 ( $M = .66$ ,  $SD = .17$ ) to Trial 2 ( $M = .83$ ,  $SD = .10$ ). Active participants performed better on the recall task ( $M = .79$ ,  $SD = .14$ ) than passive participants ( $M = .71$ ,  $SD = .18$ ). There was no significant Navigation  $\cdot$  Recall Trials interaction ( $p > .400$ ).

## VR-Based Memory Strategies

### At Encoding

For the CVLT clustering scores, only the significant effect of trials for the semantic clusters was revealed,  $F(1, 42) = 83.69$ ,  $p < .0001$ , with an increase of clusters from Trial 1 ( $M = .47$ ,  $SD = .21$ ) to Trial 2 of the free recall task ( $M = .70$ ,  $SD = .20$ ); the other effects were not significant ( $p > .700$ ). Similarly, for the ARC scores, there was only a significant effect of trials,  $F(1, 42) = 14.11$ ,  $p < .001$ , where higher scores were observed for Trial 2 ( $M = .79$ ,  $SD = .14$ ) than for Trial 1 ( $M = .67$ ,  $SD = .20$ ). The other effects were not significant ( $p > .400$ ).

### At Retrieval

The mixed ANOVA [2 (navigation: active vs. passive)  $\cdot$  2 (task: recall vs. recognition)] yielded a significant main effect of the type of task,  $F(1, 42) = 22.06$ ,  $p < .0001$ , a significant main effect of navigation,  $F(1, 42) = 6.65$ ,  $p < .05$ , but no significant interaction ( $p > .300$ ). In fact, the performances on the recognition task ( $M = .92$ ,  $SD = .07$ ) were better compared to those on the free recall task ( $M = .83$ ,  $SD = .11$ ). The active group ( $M = .90$ ,  $SD = .07$ ) performed better than the passive one ( $M = .85$ ,  $SD = .11$ ).

## VR-Based PI Effect

The 2 (navigation: active vs. passive)  $\cdot$  2 (VR version: A vs. B) mixed ANOVA revealed a significant main effect of PI,  $F(1, 42) = 179.75$ ,  $p < .0001$ , where the mean percentage of the free recall of B items was lower ( $M = .34$ ,  $SD = .05$ ) than that of the recall of A items ( $M = .66$ ,  $SD = .17$ ). The other effects did not reach significance ( $p > .07$ ).

## VR-Based FRs

The 2 (navigation mode: active vs. passive)  $\cdot$  2 (false memories: source-based FR vs. gist-based FR) mixed ANOVA revealed a significant main effect for the type of false memories,  $F(1, 42) = 30.84$ ,  $p < .0001$ , and a significant interaction,  $F(1, 42) = 4.56$ ,  $p < .05$ . Subjects provided more source-based FR ( $M = .26$ ,  $SD = .22$ ) than gist-based FR ( $M = .08$ ,  $SD = .10$ ). Passive subjects were more sensitive to source-based FR ( $M = .33$ ,  $SD = .22$ ) than active subjects ( $M = .19$ ,  $SD = .21$ ), but they were both equally sensitive to gist-based FR ( $M = .07$ ,  $SD = .07$  for passive subjects;  $M = .09$ ,  $SD = .12$  for active subjects). The navigation mode effect was not significant ( $p > .100$ ).

## Discussion

The major aim of the present study was to assess object memory using VR technology. More specifically, we sought to examine whether four memory effects relative to learning, PI, strategic processing, and FR, which are traditionally assessed together by paper-and-pencil neuropsychological tests, also occurred in VR applications. We also aimed to

examine whether these effects are differentially affected by active and passive navigation.

First, the VR-based memory test provides a learning effect, an active forgetting effect (PI), memory strategy (at encoding and at retrieval), and false memory effects, as in the paper-and-pencil tests such as the CVLT (Delis et al., 2000), while that of Matheis et al. (2007) yields only two effects (i.e., learning and passive forgetting). More precisely, we obtained a learning effect across the two trials of the free recall task confirming previous results where VR applications can be used to assess learning processes (Matheis et al., 2007; Moffat et al., 2001; Stankiewicz & Kalia, 2007). For the first time, we show that measures of clustering semantically-related items across the free recall trials and measures of PI (by comparing performances on the first trial of version A to those of the free recall of version B of the virtual apartment) are possible with VR applications as indicators of encoding strategy and active forgetting processes, respectively. Moreover, the VR-based FRs reported here fit with the three previous studies revealing VR source-based FRs (Hoffman et al., 2001; Segovia & Bailenson, 2009) or VR gist-based FRs (Flannery & Walles, 2003). For the first time, it is reported that susceptibility to FRs in the VE is more pronounced for source-based lures than for gist-based lures. This corroborates a recent assumption made by LaVoie, Mertz, and Richmond (2007) which states that in daily life, subjects are more sensitive to source-based FR than to gist-based FR. Thus, VR-based FRs closely reproduce those classically obtained in the real world.

Therefore, the replication of several laboratory-based memory effects that are typically used together in clinical settings is possible using a more naturalistic testing situation. This supports the idea that memory processes involved in VR may be similar to those previously found in laboratory, but may also be used as an analytical assessment of memory functioning in situations that are close to daily life. This confirms the interest of the VR technology as a trade-off between experimental control and a natural situation. More importantly, the combination of the four memory effects together from realistic situations is particularly relevant to conducting a neuropsychological assessment. The four memory effects are classically used to establish different cognitive impairment patterns that are useful in describing different neurological pathologies (Delis et al., 2000). The analysis of the effects can provide information about the functioning of episodic memory but also, among other things, of semantic processing and the executive abilities of categorization. For example, in Alzheimer's disease, a typical memory impairment pattern shows a poor clustering, learning, and retrieval strategy effect, but also a high amount of FR and an abnormal suppression of the build-up of PI (Lekeu et al., 2010; Stout et al., 1999). This cognitive pattern is usually interpreted as a difficulty in both episodic memory and semantic processing. In the same vein, patients with frontal lobe lesions or frontal dysfunction such as Parkinson's disease have often poor learning with poor clustering performances and a high sensitivity to FR and PI effects, but they exhibit a better recognition performance (Filoteo et al., 2009). This cognitive pattern is usually seen as being more related to executive deficits. In future studies, these

different cognitive patterns may also be observed using VR applications as a demonstration of everyday memory-related difficulties in patients.

In the results relative to navigation manipulation on the four memory effects using the VR application, an active navigation effect was observed for learning, memory strategy at retrieval, and source-based FR measures. Compared to passive subjects, active subjects showed better learning performances across the free recall trials and showed better performances on the recognition task. In addition, active navigation specifically reduced source-based FR. By contrast, active navigation did not significantly impact PI, encoding memory strategy indices (clustering scores) or gist-based FR. According to the item-specific account (advanced for SPT effect) presented by Engelkamp (2001) and Engelkamp et al. (2005). We expected a positive effect of active navigation on item-specific measures such as recognition scores, but no effect on relational measures such as clustering scores. These results were found in our VR-based object memory measures. The clustering scores did not change under the active navigation condition, supporting the hypothesis that relational measures are not influenced by active navigation. By contrast, the recognition score as an item-specific measure increased. The latter result for recognition in active navigation confirms the results provided by James et al. (2001, 2002) and Hahm et al. (2007), to which we referred in the Introduction. In addition, free recall measures that depend on both item-specific and relational information also increased in the active condition compared to the passive one. Therefore, supporting the suggestion by Brooks et al. (1999), an SPT effect can be observed in VR-based object free recall when the learning procedure (i.e., to warn subjects beforehand that they will be asked to remember something) involves participants actively discovering objects in the VE rather than actively finding a route within it. Note that the positive benefit from the active condition occurred across the two free recall trials, suggesting that better information accessibility in memory (e.g., Tulving & Pearlstone, 1966) induced by an active navigation is maintained across successive recalls. Therefore, relative to recognition, free recall, and clustering object memory measures, the present finding closely resembles conventional SPT research supporting Engelkamp's item-specific account. In addition, active navigation did not influence the effect of active forgetting (PI). In everyday life, PI is due to shared features or gist between two or more experienced events (Brainerd & Reyna, 2002). In laboratory settings, semantic similarities between the target list and interference list induce active forgetting (e.g., Keppel & Underwood, 1962). Burns (1989), with his processing trade-off hypothesis, has suggested that the effect of PI on free recall increases with the increasing of relational processing provided by a greater degree of similarities between the target list and interference list. In other words, the effect of active forgetting can be mainly seen as a relational processing reliance. Also, as observed for the clustering scores, this effect was not modified by the navigation mode. Finally, active navigation specifically reduced source-based FR while gist-based FR remained unchanged. Gist-based FRs are due to errors based on general similarity or relational

information (e.g., Balota et al., 1999; Budson, Daffner, Desikan, & Schacter, 2000; Budson, Sitarski, Daffner, & Schacter, 2002; Budson, Sullivan, Daffner, & Schacter, 2003) while source-based FRs are due to deficits in source monitoring, thereby leading to confusion between different sources (e.g., Budson, Sullivan, et al., 2002; Dalla Barba, Nedjam, & Dubois, 1999; Gallo, Kensinger, & Schacter, 2006; Multhaup & Balota, 1997; Pierce, Sullivan, Schacter, & Budson, 2005). Thus, gist-based FR of semantically-related lure items depends on remembering gist or relational information but not item-specific information. By contrast, source-based FR of previously studied items in the interference list likely depends on both item-specific and relational information. An accurate source recollection of specific details of items from the interference list can be used to reduce FRs due to reliance on general similarity or gist information (Gallo et al., 2006; Pierce et al., 2005). Therefore, the particular reduction of source-based FR under active navigation can be seen as an item-specific enrichment of the source memory for each object (by likely including sensorimotor features in object memory). This sensorimotor enrichment may help subjects to reinforce the source memory trace of each object and then to implement an efficient source monitoring in order to recall and reject source lures during the recognition test (Johnson et al., 1993).

From the overall results, PI, encoding strategy (category clustering), and gist-based FR are the three indices most related to semantic relational processing and they were not significantly modified by an active navigation, whereas free recall and source-based FR seem to depend on both relational and item-specific information and were influenced by an active navigation. Hence, a main assumption can be drawn: the perception-action coupling during active navigation is useful to enrich specific visuo-motor details of episodic memory traces (thus increasing learning, memory retrieval, and source memory-based monitoring processes), but this perception-action coupling effect has little influence when memory measures are more related to semantic relational processing (i.e., semantic clustering, PI, and gist-based FRs). Consequently, these differences may also be understood within the item-specific/relational processing account. This result corroborates that of Péruch et al. (1995) to the extent that the enactment effect, first demonstrated by the SPT paradigm (Engelkamp & Zimmer, 2002; Engelkamp et al., 1994), reflects the build-up of a lower-level representation that integrates the processing of visual and motor information into a more accurate and detailed single episodic memory trace (item-specific processing). The positive effect of active navigation in terms of free recall, correct recognition, and reduced source-based FRs can therefore be seen as an enhancement of item-specific processing. By contrast, the lack of a navigation effect on semantic clustering and gist-based FR scores may indicate that active navigation does not influence relational processing, which corroborates the assumptions made by Engelkamp and colleagues. Nevertheless, further studies are required to support these interpretations. In fact, it should be noted that all memory effects occurred after intentional learning instruction. Previous experimental studies have suggested that participants perform better on memory tasks

when they intentionally learn items, that is, when they make a conscious effort to memorize them, than when they incidentally learn items and are not informed that their memory will be tested (for reviews, see Benjamin, 2008; Finley, Tullis, & Benjamin, 2010; Son & Metcalfe, 2000). This could perhaps have a greater influence under the active condition where participants have the possibility to allocate more study time on each object (Tullis & Benjamin, 2011). This means that the benefit from active navigation on item-specific object memory measures could be not only located in sensorimotor processes, but also in controlled cognitive processes. New studies comparing intentional and incidental learning instructions should allow us to clarify this aspect of our findings. Such studies should provide more insights when considering the VR navigation taxonomy posited by Wilson et al. (1997) and Wilson (1999), which distinguishes two main components within an active navigation: decision-making and motor control. According to this taxonomy, physical active navigation (motor control), psychological active navigation (decision-making), and physical and psychological (motor control and decision-making) active navigation are differentiated. With respect to this taxonomy, Bakdash, Linkenauger, and Proffitt (2008) have demonstrated, for example, that spatial memory measures from a VE were higher in the decision-making condition (the participant decided where to go by giving verbal directions) compared to the motor control condition (the experimenter gave directions to the participant), but they were similar in the decision-making and in the combined condition (the participant decided where to go and controlled his/her movements). These findings suggest that decision-making is also an essential cognitive process in active navigation that impacts spatial memory. This may likely be taken into account for the navigation effects reported here on object memory measures. Nevertheless, this study did not include the physically passive navigation condition, which could provide information solely about the effect of motor control. In addition, only location recognition measures that probe mostly item-specific information were used. Thus, taken together, the navigation taxonomy that probes the role of decision-making and motor control processes, and the item-specific/relational processing framework may constitute a relevant way to explain the inconsistency of VR research findings on active navigation in the areas of both object memory and spatial memory. This new way of investigation may provide fruitful insights into the debate on the spatial versus object memory dissociation issue (Brooks et al., 1999; Haxby et al., 1991; Pugnetti et al., 1998; Rosenbaum, Gao, Richards, Black, & Moscovitch, 2005; for a unified neurocognitive model of episodic memory for objects and spatial memory, see Burgess et al., 2002; Eichenbaum, 2003; Moscovitch et al., 2005; Rolls, Stringer, & Trappenberg, 2002).

To conclude, further investigations concerning the differential effect of sensorimotor integration on item-specific versus relational processing in episodic memory based on VR are necessary to shed light on controversial results concerning active versus passive navigation in the literature. Nevertheless, the main aims of the present study were fulfilled as (a) we obtained the expected effects of the four memory

components yielding data classically obtained on the standard paper-and-pencil memory tests (i.e., learning, PI, memory strategies, and false memories indicators) and (b) we showed an active superiority effect on three of them (learning measure, retrieval strategy measure, and false memories measure), demonstrating the crucial role of active navigation in strengthening distinctive memory traces and enriching source memory, but not on memory measures influenced by relational processing (active forgetting, encoding strategies, and gist-based FRs). This is a key finding that will perhaps open a way of understanding inconsistencies regarding the literature on active versus passive navigation. In other words, VR applications provide a fruitful research approach to investigate links between memory performances and activity, and therefore to better grasp memory functioning in daily living. Consequently, its clinical application may be particularly useful for neuropsychological diagnosis with regard to impaired memory mechanisms as well as memory-related daily life disabilities. In particular, the full understanding of active navigation could be clinically relevant to understand everyday difficulties in different populations, from older subjects (Norris & West, 1993) to patients suffering from dementia (Lekeu, Van der Linden, Moonen, & Salmon, 2002) and from other neurological disorders (Mimura et al., 1998), for which an intact SPT effect is sometimes demonstrated.

### Acknowledgments

The authors thank Dr. N. Mulligan for suggesting the assumption that enhanced memory performances under the active navigation condition may be also due to metacognitive control and decision-based strategies.

### References

- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1997). Environmental knowledge is subserved by separable dorsal/ventral neural area. *Journal of Neuroscience*, *17*, 2512 - 2518.
- Alario, F.-X., & Ferrand, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for French: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *31*, 531 - 552.
- Bakdash, J. Z., Linkenauger, S. A., & Proffitt, D. (2008). Comparing decision-making and control for learning a virtual environment: Backseat drivers learn where they are going. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, *52*, 2117 - 2121.
- Balota, D. A., Cortese, M. J., Duchek, J. M., Adams, D., Roediger, H. L. III, McDermott, K. B., & Yeris, B. E. (1999). Veridical and false memories in healthy older adults and in dementia of the Alzheimer's type. *Cognitive Neuropsychology*, *16*, 361 - 384.
- Benjamin, A. S. (2008). Memory is more than just remembering: Strategic control of encoding, accessing memory, and making decisions. In A. S. Benjamin & B. H. Ross (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Skill and strategy in memory use* (Vol. 48, pp. 175 - 223). London, UK: Academic Press.
- Brainerd, C. J., & Reyna, V. F. (2002). Fuzzy-trace theory and false memory. *Current Directions in Psychological Science*, *11*, 164 - 169.
- 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*, 65 - 78.
- Brooks, B. M., Rose, F. D., Potter, J., Jayawardena, S., & Morling, A. (2004). Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality. *Brain Injury*, *18*, 391 - 401.
- Budson, A. E., Daffner, K. R., Desikan, R., & Schacter, D. L. (2000). When false recognition is unopposed by true recognition: Gist-based memory distortion in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, *14*, 277 - 287.
- Budson, A. E., Sitarski, J., Daffner, K. R., & Schacter, D. L. (2002). False recognition of pictures versus words in Alzheimer's disease: The distinctiveness heuristic. *Neuropsychology*, *16*, 163 - 173.
- Budson, A. E., Sullivan, A. L., Daffner, K. R., & Schacter, D. L. (2003). Semantic versus phonological false recognitions in aging and Alzheimer's disease. *Brain and Cognition*, *51*, 251 - 261.
- Budson, A. E., Sullivan, A. L., Mayer, E., Daffner, K. R., Black, P. M., & Schacter, D. L. (2002). Suppression of false recognition in Alzheimer's disease and in patients with frontal lobe lesions. *Brain*, *125*, 2750 - 2765.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, *35*, 625 - 641.
- Burgess, N., Maguire, E. A., Spiers, H. J., & O'Keefe, J. (2001). A temporoparietal and prefrontal network for retrieving the spatial context of lifelike events. *NeuroImage*, *14*, 439 - 453.
- Burns, D. J. (1989). Proactive interference: An item-specific versus relational processing account. *Journal of Memory and Language*, *28*, 345 - 359.
- Craik, F. I. M. (1983). On the transfer of information from temporary to permanent memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, *302*, 341 - 359.
- Dalla Barba, G., Nedjam, Z., & Dubois, B. (1999). Confabulation, executive functions, and source memory in Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, *16*, 385 - 398.
- Delis, D. C., Kramer, J. H., Kaplan, E., & Ober, B. A. (2000). *California verbal learning test: Adult version manual* (2nd ed.). San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Deluca, J., & Chiaravalloti, N. (2004). Memory and learning in adults. In G. Goldstein & S. Beers (Eds.), *Comprehensive handbook of psychological assessment: Intellectual and neuropsychological assessment* (Vol. 1, pp. 217 - 236). Hoboken, NJ: Wiley.
- Einchenbaum, H. (2003). The hippocampus, episodic memory, declarative memory, spatial memory ... where does it all come together? *International Congress Series*, *1250*, 235 - 244.
- Engelkamp, J. (2001). Action memory: A system-oriented approach. In H. D. Zimmer, R. L. Cohen, M. J. Guynn, J. Engelkamp, R. Kormi-Nouri, & M. A. Foley (Eds.), *Memory for action: A distinct form of episodic memory?* (pp. 144 - 150). New York: Oxford University Press.
- Engelkamp, J., & Dehn, D. M. (2000). Item and order information in subject-performed tasks and experimenter performed tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 671 - 682.
- Engelkamp, J., Seiler, K. H., & Zimmer, H. (2005). Differential relational encoding of categorical information in memory for action events. *Memory & Cognition*, *33*, 371 - 379.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1994). *The human memory: A multimodal approach*. Seattle, WA: Hogrefe.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1997). Sensory factors in memory for subject-performed tasks. *Acta Psychologica*, *96*, 43 - 60.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (2002). Free recall and organization as a function of varying relational encoding in action memory. *Psychological Research*, *66*, 91 - 98.



- Engelkamp, J., Zimmer, H. D., Mohr, G., & Sellen, O. (1994). Memory of self-performed tasks: Self-performing during recognition. *Memory & Cognition*, *22*, 34 - 39.
- Fields, A. W., & Shelton, A. L. (2006). Individual differences and large-scale environmental learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 506 - 515.
- Filoteo, J. V., Salmon, D. P., Schiehser, D. M., Kane, A. E., Hamilton, J. M., Rilling, L. M., ... Galasko, D. R. (2009). Verbal learning and memory in patients with Dementia with Lewy Bodies or Parkinson's Disease with Dementia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31*, 823 - 834.
- Finley, J. R., Tullis, J. G., & Benjamin, A. S. (2010). Metacognitive control of learning and remembering. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), *New science of learning: Cognition, computers and collaborators in education*. New York: Springer Science & Business Media, LLC.
- Flannery, K. A., & Waller, R. (2003). How does schema theory apply to real versus virtual memories? *CyberPsychology and Behavior*, *6*, 151 - 159.
- Gallo, D. A. (2006). *Associative illusions of memory: Research on false memory for related events*. New York: Psychology Press.
- Gallo, D. A., Kensinger, E. A., & Schacter, D. L. (2006). Prefrontal activity and diagnostic monitoring of memory retrieval: fMRI of the criteria recollection task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 135 - 148.
- 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*, 409 - 420.
- 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*, 305 - 308.
- Haxby, J. V., Grady, C. L., Horwitz, B., Ungerleider, L. G., Mishkin, M., Carson, R. E., ... Rapoport, S. I. (1991). Dissociation of spatial and object visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proceeding of the National Academy of Sciences USA*, *88*, 1621 - 1625.
- Hoffman, H., Garcia-Palacios, A., Thomas, A. K., & Schmidt, A. (2001). Virtual reality monitoring: Phenomenal characteristics of real, virtual and false memories. *CyberPsychology and Behavior*, *4*, 565 - 572.
- Hunt, R. R., & Einstein, G. O. (1981). Relational and item-specific information in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 497 - 514.
- James, K. H., Humphrey, G. K., & Goodale, M. A. (2001). Manipulating and recognizing virtual objects: Where the action is. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *55*, 111 - 120.
- James, K. H., Humphrey, G. K., Vilis, T., Corrie, B., Baddour, R., & Goodale, M. A. (2002). 'Active' and 'passive' learning of three-dimensional object structure within an immersive virtual reality environment. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *34*, 383 - 390.
- Johnson, M. K., Hashtroudi, S., & Lindsay, D. S. (1993). Source monitoring. *Psychological Bulletin*, *114*, 3 - 28.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, *3*, 203 - 220.
- Keppel, G., & Underwood, B. J. (1962). Proactive inhibition in short term retention of single items. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *1*, 153 - 161.
- Kormi-Nouri, R. (1995). The nature of memory for action events: An episodic integration view. *European Journal of Cognitive Psychology*, *7*, 337 - 363.
- Langevin, S., Sauzéon, H., Taconnat, F., & Kaoua, B. (2009). Les fausses reconnaissances induites par les paradigmes DRM, MI et tâches dérivées. *L'Année Psychologique*, *109*, 701 - 731.
- LaVoie, D. J., Mertz, H. K., & Richmond, T. L. (2007). False memory susceptibility in older adults: Implications for the elderly eyewitness. In M. P. Toglia, J. D. Read, D. F. Ross, & R. C. L. Lindsay (Eds.), *The handbook of eyewitness psychology, vol 1: Memory for events* (pp. 605 - 625). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Lekeu, F., Magis, D., Marique, P., Delbeuck, X., Bechet, S., Guillaume, B., ... Salmon, E. (2010). The California Verbal Learning Test and other standard clinical neuropsychological tests to predict conversion from mild cognitive impairment to dementia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *32*, 164 - 173.
- Lekeu, F., Van der Linden, M., Moonen, G., & Salmon, E. (2002). Exploring the effect of action familiarity on SPTs recall performance in Alzheimer's disease. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section A. Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *24*, 1057 - 1069.
- Lieury, A., Iff, M., & Duris, P. (1976). *Normes d'associations verbales, Document ronéoté*. Boulogne-Billancourt, France: Laboratoire de Psychologie expérimentale.
- Mangels, J. A., Gershberg, F. B., Shimamura, A. P., & Knight, R. T. (1996). Impaired Retrieval from remote memory in patients with frontal lobe damage. *Neuropsychology*, *10*, 32 - 41.
- Matheis, R. J., Schultheis, M. T., Tiersky, L. A., DeLuca, J., Millis, S. R., & Rizzo, A. (2007). Is learning and memory different in a virtual environment? *The Clinical Neuropsychologist*, *21*, 146 - 161.
- McDaniel, M. A., Dornburg, C. C., & Guynn, M. J. (2005). Disentangling encoding versus retrieval explanations of the bizarreness effect: Implications for distinctiveness. *Memory & Cognition*, *33*, 270 - 279.
- Mimura, M., Komatsu, S., Kato, M., Yashimasu, H., Wakamatsu, N., & Kashima, H. (1998). Memory for subject-performed task in patients with Korsakoff syndrome. *Cortex*, *34*, 297 - 303.
- Moffat, S. D., & Resnick, S. (2002). Effects of age on virtual environment place and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neurosciences*, *116*, 851 - 859.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, *22*, 787 - 796.
- Moscovitch, M. (1989). Confabulations and the frontal systems: Strategic versus associative retrieval in neuropsychological theories of memory. In H. L. Roediger, III & F. I. M. Craik (Eds.), *Varieties of memory and consciousness: An essay in honour of Endel Tulving* (pp. 133 - 160). New Jersey, NJ: Erlbaum.
- Moscovitch, M., Rosenbaum, S. R., Gilboa, A., Addis, D. R., Westmacott, R., Grady, C., ... Nadel, L. (2005). Functional anatomy of remote episodic, semantic and spatial memory: A unified account based on multiple trace theory. *Journal of Anatomy*, *207*, 35 - 66.
- Moscovitch, M., & Winocur, G. (2002). The frontal cortex and working with memory. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Eds.), *Principles of frontal lobes function* (pp. 188 - 209). New York: University Press.
- Multhaup, K. S., & Balota, D. A. (1997). Generation effects and source memory in healthy older adults and in adults with dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychology*, *11*, 382 - 391.
- Norris, M. P., & West, R. L. (1993). Activity memory and aging: The role of motor retrieval and strategic processing. *Psychology and Aging*, *8*, 81 - 86.

- Parslow, D. M., Morris, R. G., Fleminger, S., Rahman, Q., Abrahams, S., & Recce, M. (2005). Allocentric spatial memory in humans with hippocampal lesions. *Acta Psychologica*, *118*, 123 – 147.
- Parson, T., & Rizzo, A. A. (2008). Initial validation of a virtual environment for assessment of memory functioning: Virtual reality cognitive performance assessment test. *CyberPsychology and Behavior*, *11*, 17 – 25.
- Péruch, P., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, *7*, 1 – 20.
- Péruch, P., & Wilson, P. N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, *5*, 218 – 227.
- Peterson, D. J., & Mulligan, N. W. (2010). Enactment and retrieval. *Memory & Cognition*, *38*, 233 – 243.
- Pierce, B. H., Sullivan, A. L., Schacter, D. L., & Budson, A. E. (2005). Comparing source-based and gist-based false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, *19*, 411 – 419.
- Pugnetti, L., Mendozzi, L., Brooks, B. M., Atree, E. A., Barbieri, E., Alpini, D., ... 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*, 424 – 430.
- Roediger, H. L. III, & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented in lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *21*, 803 – 814.
- Roenker, D. L., Thompson, C. P., & Brown, S. C. (1971). Comparison of measures for the estimation of clustering in free recall. *Psychological Bulletin*, *76*, 45 – 48.
- Rolls, E. T., Stringer, S. M., & Trappenberg, T. P. (2002). A unified model of spatial and episodic memory. *Proceedings of the Royal Society of London, B*, *269*, 1087 – 1093.
- Rosenbaum, S. R., 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*, 446 – 462.
- Sauzéon, H., Claverie, B., & N' Kaoua, B. (2006). Age differences in the organization and acquisition-forgetting processes in a multi-free-recall task. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition*, *18*. Retrieved from <http://cpl.revues.org/index1012.html>.
- Schacter, D. L. (1999). The cognitive neuropsychology of false memories: Introduction. *Cognitive Neuropsychology*, *9*, 193 – 195.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: 1. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, *84*, 1 – 66.
- Schultheis, M. T., & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, *46*, 296 – 311.
- Segovia, K. Y., & Bailenson, J. N. (2009). Virtually true: Children's acquisition of false memories in virtual reality. *Media Psychology*, *12*, 371 – 393.
- Son, L. K., & Metcalfe, J. (2000). Metacognitive and control strategies in study-time allocation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 204 – 221.
- Stankiewicz, B. J., & Kalia, A. A. (2007). Acquisition of structural versus object landmark knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*, 378 – 390.
- Stout, J. C., Bondi, M. W., Jernigan, T. L., Archibald, S., Delis, D., & Salmon, D. P. (1999). Regional cerebral volume loss associated with verbal learning and memory in dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychology*, *13*, 188 – 197.
- Tlauka, M., Keage, H., & Clark, C. R. (2005). Viewing a map versus reading a description of a map: Modality-specific encoding of spatial information. *Cognitive Science*, *29*, 807 – 818.
- Tullis, J. G., & Benjamin, A. S. (2011). On the effectiveness of self-paced learning. *Journal of Memory and Language*, *64*, 109 – 118.
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual Review of Psychology*, *53*, 1 – 25.
- Tulving, E., & Pearlstone, Z. (1966). Availability versus accessibility of information in memory for words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *5*, 381 – 391.
- von Essen, J. D. (2005). Enactment enhances integration between verb and noun, but not relational processing, in episodic memory. *Scandinavian Journal of Psychology*, *46*, 315 – 321.
- Wallet, G., Sauzéon, H., Arvind Pala, P., 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., & 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.
- Weniger, G., Ruhleder, M., Wolf, S., Lange, C., & Irlé, E. (2009). Egocentric memory impaired and allocentric memory intact as assessed by virtual reality in subjects with unilateral parietal cortex lesions. *Neuropsychologia*, *47*, 59 – 69.
- Wilson, P. N. (1999). Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or memory for objects. *Environment & Behavior*, *31*, 752 – 763.
- Wilson, P. N., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active versus passive processing of spatial information in a computer-simulated environment. *Ecological Psychology*, *9*, 207 – 222.

Received November 24, 2010

Revision received June 13, 2011

Accepted July 21, 2011

Published online November 4, 2011

Hélène Sauzéon

---

University of Bordeaux 2 Victor Segalen  
 Laboratoire EA 487 Cognition et Facteurs Humains  
 Bordeaux  
 Aquitaine  
 France  
 E-mail [helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr](mailto:helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr)

---

**II. Effects of age and active navigation on episodic memory processes using a virtual apartment task (*Effets de l'âge et de la navigation active sur les processus de mémoire épisodique mis en évidence par une tâche d'appartement virtuel*). Article soumis dans *Psychology and Aging*.**

Effects of age and active navigation on episodic memory processes using a virtual apartment task.

Soumis dans *Psychology and Aging*.

Arvind Pala, Prashant<sup>1\*</sup>, N'Kaoua, Bernard<sup>1</sup>, Taillade, Mathieu<sup>1</sup>, & Sauzéon, Hélène<sup>1,2\*</sup>.

<sup>1</sup> Disability and Nervous System Laboratory (EA4136), University of Bordeaux Segalen,  
Bordeaux, France

<sup>2</sup> INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), Bordeaux,  
France.

\* Correspondence should be addressed to Hélène Sauzéon (e-mail: helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr; phone number: + 33648221279) ; address: Laboratoire EA 4136 Handicap & System Nerveux, Bât. 1B, 1er étage, Université Bordeaux Segalen, 146, rue Léo Saignat, 33000 Bordeaux, France.

**Abstract**

Active navigation is sometimes shown to enhance spatial memory but its role in object memory is still unclear. Episodic memory is also shown to decline with aging. Therefore, active navigation could serve as a particular mean to increase older adults' memory for everyday objects. The goal of the present study was therefore to investigate the effects of aging on multiple episodic memory processes such as *learning*, *proactive interference* (PI), *semantic clustering*, *recognition hits* and *false recognitions* in a naturalistic situation using a multi-trial free recall paradigm (e.g., the California Verbal Learning Test, CVLT) implemented in a VR-based apartment. We also examined the neuropsychological correlates (executive functioning and episodic memory) of navigation-related age effects on memory. Younger and older adults either actively navigated or passively followed the computer-guided tour of an apartment presented in two versions (A and B). The results indicated that active navigation increased recognition hits compared to passive navigation but the other measures did not improve (learning, PI, and semantic clustering) to a similar extent in either age group. Furthermore, active navigation helped to reduce the number of false recognitions made by younger adults but increased those made by older adults. This differential effect of active navigation in younger and older adults was accounted for by executive functioning. The results are interpreted in terms of the item-specific/relational processing distinction (Hunt & Einstein, 1981) and are consistent with a source-monitoring deficit in older adults.

*Keywords:* Aging, active navigation, object memory, item-specific processing, executive functioning.

## 1. Introduction

Episodic memory is known to decline with aging and this type of memory decline is one of the most disabling consequences with respect to the main role of memory needed to effectively perform numerous everyday life activities (e.g., remembering personal experiences such as the location of personal keys at home; McDaniel, Einstein, & Jacoby, 2008). In everyday life, memory and other cognitive functions are intermingled in actions (Foley & Ratner, 2001). Thus, the study of sensorimotor involvement in older adults during learning and memory performances is critical for a better understanding of the way memory functions in everyday life. The goal of the present study was therefore to investigate the effects of aging on episodic memory in a naturalistic situation using virtual reality (VR) and to investigate how sensorimotor information can modulate age-related effects through active navigation. In everyday life, complex activities involving motor encoding often tap “higher cortical functions” such as planning and decision-making (Luria, 1962), activities in which older adults are known to exhibit lower performances compared to their younger counterparts; therefore, we also wanted to investigate the relationship of active navigation with executive functioning.

In neuropsychology, it is crucial to understand how sensorimotor information processing interacts with cognitive processing, particularly within the field of cognitive aging. Recently, the use of VR devices has rendered this possible in the most ecological way possible (e.g., Jansen-Osmann & Fuchs, 2006). For instance, subjects actively navigating (e.g., using joysticks and a mouse to freely interact with the virtual environment and study objects) within a virtual environment are compared to subjects in a “passive navigation” condition who do not have any control on the encoding phase (i.e., self-paced study time or making decisions about which stimulus to encode, etc.). Research in this domain has mostly focused on spatial memory; very few authors have been interested in memory for objects.

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

However, conflicting results are observed across studies for both spatial memory and object memory. For instance, within the spatial domain, a beneficial effect of active navigation has been reported in some studies (Brooks, Attree, Rose, Clifford, & Leadbetter, 1999; Péruch & Wilson, 2004; Wallet et al., 2009, 2011) but not in others (Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997; Wilson, 1999; Gaunet, Vidal, Kemmeny, & Berthoz, 2001). Similarly, some studies have reported a superiority effect of active navigation with regards to object memory (Hahm et al., 2007; Sauzéon et al., 2012; von Stülpnagel & Steffens, 2012) but not others (Brooks et al., 1999). For example, in Sauzéon et al.'s study, young subjects either actively or passively visited two versions of an apartment (version A and B) comprised of four rooms in which they encountered objects that they were explicitly told to memorize for a subsequent memory test. A multi-trial free recall procedure inspired by traditional episodic memory tests such as the California Verbal Learning Test (Delis et al., 1987) was used to assess several episodic memory processes. In particular, these procedures can be used to measure *learning processes* (i.e., the increase in the free recall performances across the trials) and *proactive interference (PI)* (i.e., the detrimental effect of prior learning on the retrieval of subsequent information). A delayed yes/no recognition task was finally administered, allowing the assessment of *recognition hits* and *false recognitions* (i.e., to erroneously claim that a new item was previously studied or that an item was previously studied in another context). Additionally, the ability to cluster items according to their semantic relatedness (*semantic clustering*) during free recall was also measured. Sauzéon et al. (2012) found better learning and recognition performances and reduced susceptibility to false recognitions after active navigation, while active and passive participants did not differ in terms of the semantic clustering strategy or PI effect.

It has been suggested that the active navigation effect is analogous to the *enactment effect*, since both describe an enhancement of the subsequent memory performances by motor

information (Brooks et al., 1999). The enactment effect refers to the fact that better recall and recognition performances are observed in participants actually performing actions (the Subject-Performed Task or SPT) compared to those who verbally learn action phrases (or verb-noun pairs) such as “*take the glass*” (Cohen, 1989; Engelkamp, Zimmer, Mohr, & Sellen, 1994). If active navigation and the SPT paradigm are analogous, they should share similar properties regarding underlying mechanisms. According to Engelkamp (2001), the enactment effect occurs due to enhanced item-specific information provided by motor encoding. Indeed, performing actions during encoding enhances free recall and correct recognition performances, but it does not have any effect on tasks relying on relational processing such as semantic clustering (Peterson & Mulligan, 2010). Item-specific processing relates to the encoding of features that make a stimulus distinctive (i.e., item-car; distinctive feature-red) while relational processing is defined as the processing of shared features or gists (i.e., car; shared feature-vehicle) (Hunt & Einstein, 1981). Note that the results found by Sauzéon et al. displayed similar properties for active navigation, supporting Brooks et al.’s (1999) hypothesis.

When focusing on processes related to episodic memory functioning, a number of data also support the view that older adults are impaired in terms of item-specific processing but not relational processing (Basden, Basden & Bartlett, 1993; Dennis, Kim, Cabeza, 2007; Sharps, Day, Nunes, Neff, & Woo, 2004). Thus, enhancing the distinctiveness of information may prove beneficial for older adults in terms of higher recall and recognition (McCabe, Presmanes, Robertson, & Smith, 2004; Thomas & Sommers, 2005). For instance, older adults have been shown to benefit from a number of effects based on distinctive processing in terms of correct recall and recognition (e.g., *the isolation effect*, Geraci, McDaniel, Manzano, & Reodiger, 2009), including the enactment effect (Brooks & Gardiner, 1994; Rönnlund, Nyberg, Bäckman, & Nilsson, 2003). However, this benefit from an enactment condition in



## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

older adults typically does not eliminate age differences in free recall (Brooks & Gardiner, 1994; Dijkstra & Kaschak, 2006; Feyereisen, 2009; Rönnlund et al., 2003). Additionally, given the previous results found in the literature on active navigation, a potential benefit from active navigation in older adults would be a major issue for neuropsychologists, especially within memory training programs if the active navigation is analogous to the enactment effect. Unfortunately only two studies have investigated this issue so far, either reporting an absence of any significant difference between active and passive navigation in both younger and older adults (Plancher et al., 2010), or a detrimental effect of active navigation on spatial memory performances in older adults, resulting in more errors and stops during a spatial wayfinding task (Taillade et al., 2013). This brief overview of the literature mentions the scarcity and inconsistency of findings relative to active navigation and its effects on memory for objects. Furthermore, it is still not clearly understood if active navigation eliminates or increases age differences in episodic memory for objects.

Interestingly, executive functioning was found to be a mediator between age and wayfinding performances in Taillade et al.'s (2013) study, but only in the active navigation condition. The latter results suggest that active navigation requires effortful processing, especially in complex everyday tasks where optimal memory functioning is necessary, and that older adults do not benefit from active navigation due to an age-related deficit in controlled processing. In fact, a large body of work has shown that age differences in episodic memory are likely to result from primary deficits in executive functioning (e.g. Troyer, Graves & Cullum, 1996). Although this executive deficit hypothesis (Braver & West, 2008) was not directly tested to investigate age differences in memory for actions, one interesting insight into the matter is provided by Nyberg, Persson, & Nilsson (2002), who showed in their meta-analysis that about 5 to 10% of those persons who do not show an enactment effect are older adults aged between 65-70 years, and more than 25% of the elderly aged between 75-80

also fail to benefit from enacted encoding, probably due to a deficit in dopaminergic neurotransmission involved in motor functioning (see Salamone, 1992, for a review), in executive functioning (Monchi, Ko, & Strafella, 2006), as well as in episodic memory functioning (McDonald, Cervenka, Farde, Nyberg, & Bäckman, 2009). Overall, these findings suggest the existence of a differential effect of active navigation in younger and older adults perhaps through different cognitive mechanisms.

In the present study, we used the VR-based HOMES (Human Objects Memories from Everyday Scenes) task developed by Sauzéon and colleagues (Sauzéon et al., 2012) to investigate memory for everyday objects. Two main goals were drawn up from the overall data: First, using VR to implement a natural activity (i.e., visiting an apartment) we wanted to investigate if active navigation similarly improves younger and older adults' memory for everyday objects. Specifically, according to the "item-specific vs. relational processing" account, it can be expected that, compared to passive navigation, active navigation enhances *learning* and *recognition hits* in both younger and older adults. Furthermore, active navigation similarly reduces their susceptibility to *false recognitions*. However, it does not have any beneficial effect on semantic clustering and PI irrespective of the age group. Our second goal was to investigate the neuropsychological correlates of active navigation in younger and older adults. For that purpose, the contributions of executive/frontal functioning and episodic memory/medial temporal lobe functioning to navigation-related memory effects were examined.

## 2. Method

### 2.1. Participants

Thirty younger ( $M = 22.28$ ;  $SD = 2.08$ ; age range = 18-25.30) and 30 older adults ( $M = 66.70$ ;  $SD = 5.34$ ; age range = 60-81) participated in the present study. The younger

participants were recruited from among students at the University of Bordeaux 2 and the older adults from community leisure institutions (OAREIL, Université du Temps Libre). All of the participants gave their informed consent. The participants also underwent a clinical interview for exclusion criteria and were excluded if one of the following conditions were reported: history and/or presence of alcohol, substance abuse, neurological and psychiatric disorders. The older participants were screened using the MMSE and had a score superior to 28/30 (Mini-Mental Status Examination; Folstein, Folstein, & McHugh, 1975). All of the participants had to complete a French version of the SSQ (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993) which measures the severity of sickness induced by 3D simulators (e.g., virtual reality). The questionnaire consisted of a list of 16 symptoms clustered into three factors: Oculomotor, Nausea and Dizziness. The 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*. The weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy et al. (1993).

### *2.2. Neuropsychological battery*

The participants also underwent a neuropsychological assessment of episodic memory and executive functioning with the following tests. See Table 1 for the demographic characteristics of the participants along with their neuropsychological scores.

*Episodic memory.* The CVLT (Delis et al., 1987) was administered as a measure of episodic memory. Free recall trial 5 (max. score = 16) and the recognition hits (max. score = 16) were taken as global measures of episodic memory.

*Executive functioning.* Executive functioning was assessed using the mental rotation test (Vanderberg & Kuse, 1978) and the Stroop color-word task (Stroop, 1935). The mental rotation task is mainly a visuospatial task; it is also assumed that it depends on high-level

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

strategic control and executive processes (Vandierendonck, Kemps, Fastame, & Szmalec, 2004). The participants had to complete the mental rotation test in two parts. Each part, completed in 3 minutes, was comprised of 10 items, with five items each on two different pages. Each item consists of five geometrical figures, among which the first one in the left-most location is the target that the participants have to find among four following response-choices. These four choices are comprised of two correctly rotated figures and two foils. Two points were given when the subjects correctly identified the two targets among the four possible choices, 1 point was given if a participant only gave one correct answer out of the four possible choices, and 0 points were given if he/she gave either one correct and one incorrect answer, two incorrect answers or no answer at all. The total of correctly identified items among the four possible choices were then scored as the dependent variable (max. score = 40).

The Stroop test consists of three sheets of papers representing three subtasks. Color names are printed in black ink on the first sheet, colored rectangles are printed on the second sheet, and a word-color sheet consisting of color names printed in non-matching colors. For each sheet, the participants have to read the printed words (for the first sheet) or name the colors (for the two other sheets) as quickly as possible. For the third sheet however, the participants have to ignore the meaning of the word while naming the color in which the words are printed (e.g., say “blue” for the word *red*). The response times are measured along with the number of errors they made on each subtask. However, only the interference errors were taken as a measure of the response inhibition in the present study (Vendrell, Junqué, Pujol, Jurado, Molet, & Grafman, 1995).

(Insert Table 1 about here)

### *2.3. Composite scores*

Based on the correlations between age and the neuropsychological measures for each cognitive domain (episodic memory and executive functioning), a z-score for each individual neuropsychological measure was calculated. These z-scores were finally averaged to calculate a composite score for both episodic memory (EM) and executive functioning (EF). We found a significant and positive correlation between EM and EF ( $r = .34$ ,  $p < .01$ ). However, after controlling for age (coded as a dichotomous variable with young = 0 and old = 1; Bryan and Luszcz, 1996), this correlation was no longer significant ( $r = .16$ ,  $p > .200$ ).

(Insert Table 1 about here)

### *2.4. Materials and Procedure*

The virtual environment was viewed using a F1+ overhead video projector on a 2 x 1.88 meter large screen fixed onto the wall. We used a Dell® processor (3 GHz, 5 Gbytes in RAM) and a NVidia® Quadro FX 4400 graphic card to generate a virtual apartment built using the Virtools® software. The participants sat 2 meters away from the display screen in a dark, silent room to visualize the VE projected in front of them. Each participant visualized two versions (versions A and B) of a virtual apartment consisting of 40 target (or intended) objects: 20 objects that were specific to each version and 20 objects common to both versions. There were four categories [a bedroom (Fig. 1), a bathroom, a kitchen, and a sitting-room]; therefore, each category contained 10 of these objects, five specific objects and five objects that were found in both versions. However, to fit the “face validity”, that is to say, in order to give a realistic rendering of the apartment, each room contained additional objects that were not targeted and therefore, held constant across both versions (e.g., the floor, the windows, and the view of the landscape outside the apartment, etc.). The objects in the two versions

were equivalent in terms of the association norms and the object frequency norms as given by Alario & Ferrand (1999).

*The VR assessment.* This procedure was identical to that described by Sauzéon et al. (2012). The participants watched each room of each version of the apartment during 50 seconds; since there were four rooms (corresponding to the four categories), the total amount of time spent watching each version lasted 200 seconds. The older and younger adults were randomly assigned to either the “active navigation” or “passive navigation” condition (see the method section for a detailed description). The active participants used a combination of the keyboard and the mouse to actively and freely explore the apartment. Arrows on the keyboards allowed translational movements in specific directions (left-right/forward-backward) while use of the mouse allowed rotational movements (allowing for a 360° rotation along the head-centered coordinates). A practice session was administered to them which lasted 3 min., in order to get familiarized with the use of the keyboard-mouse combination. A computer-guided tour of the apartment was administered to the passive participants. However, regardless of their navigation condition, the participants could not get out of the room they were exploring until the computer brought them to the next room upon the completion of a 50 second exploration of the room.

(Insert Figure 1 about here)

The VR-based assessment consisted of two learning trials in which the participants first watched a target version of the apartment (called version A) which was presented twice and then each participant was asked to complete a free recall task immediately after each presentation. Before each trial started, the experimenter gave the following instruction to the participants: “Carefully watch everything in the apartment because you will have to

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

immediately recall all of the objects that you previously saw”. Immediately after the last trial, the participants visualized the other version of the apartment (version B) followed by only one immediate free recall task. The same instruction was repeated before the presentation of this second version. The presentation of the two versions was counterbalanced across the participants (i.e., half of the participants watched one version first as the target version, and the other half watched the other version first). After the recall of version B, within a delay of 10 minutes, the subjects had to fill in the NT and SSQ questionnaires that are described in the “participants” section. After this 10 minute delay, a final yes/no recognition task was administered to all of the participants. Since both versions of the apartment were counterbalanced across participants, two lists containing 56 words each were constructed accordingly: the first list corresponded to one version as the target apartment and the second list corresponded to the other version as the target apartment. In both lists, 40 target items and 16 foils were presented in a pseudo-random order. Among the targets, 20 items were specific to the target version (version A) and 20 were common to both versions (i.e., studied during the visualization of both version A and B, and thus held constant across the lists). Among the foils, eight items were specific to version B and were considered as source lures; the eight remaining items were unstudied items considered as gist lures (they were not presented during the encoding phase but were semantically-related to the target items and had similar constructions in terms of associative norms criteria). For each item, the participants decided whether it had been presented in the target version of the apartment (“yes”) or not (“no”). Thus, if a source lure was recognized as a target, the subject made a source-based false recognition; if a gist lure (semantically related lure) was recognized as a target, the participant made a gist-based false recognition.

*Scoring.* Learning was measured as the proportion of correct free recall for trials 1 and 2 of the target version. Free recall was calculated as the mean proportion of objects correctly

recalled (with a maximum of 40 points since there were 40 target items). The semantic clustering of objects belonging to each of the four categories (i.e., the four rooms) for each trial was scored using the List-Based Clustering (LBC, Stricker et al., 2002). The LBC calculates an expected cluster value, the number of clusters expected by chance (EXP), based on the number of objects recalled ( $r$ ), the number of objects in a category ( $m$ ), and the total number of objects studied ( $N_L$ ):  $EXP = [(r-1)*(m-1)]/(N_L-1)$ . The LBC score is calculated by subtracting the expected value given in the above equation from the observed number of clusters [ $LBC = OBS - EXP$ ]. Hence, the maximum score for the VR-based semantic clustering is 27 ( $r = 40$ ; observed = 36) and the minimum score is -9 ( $r = 40$ ; observed = 0). PI was assessed as the discrepancy between the free recall performances for version A and version B (first learning trial 1 version A vs. free recall of version B). The recognition hits were calculated as the proportion of correctly recognized target items out of 40. Finally, false recognition was measured as the proportion of false alarms during the recognition task, separately for source-based false recognitions (number of source-based lures incorrectly recognized as targets divided by the total number of source-based lures in the list, max. = 8) and gist-based false recognitions (number of gist-based lures incorrectly recognized as targets divided by the total number of gist-based lures in the list, max. = 8).

### *2.5. Statistical analysis*

Statistical analyses were performed following two steps. First, mixed ANOVAs were carried out to compare the performances with a 2 (age: younger vs. older) X 2 (navigation: active vs. passive) X 2 (memory process) design with age and navigation as the between-subject factors and each memory process as the within-subject factor [learning: trial 1 vs. trial 2; semantic clustering: trial 1 vs. trial 2; PI: free recall trial 1 version A vs. free recall version B; and false recognitions: source-based vs. gist-based] on the virtual apartment memory test.



A separate factorial design 2 (age) X 2 (navigation) ANOVA was performed on the recognition hits, with the mean proportion of recognition hits as the dependent variable. The mean performances were expressed as the proportion of correct free recalls for the learning and PI measures, the mean LBC scores for the semantic clustering and the mean proportion of false recognitions (separately for source-based and gist-based false alarms). The alpha level of significance was set at 0.05. Effect sizes were estimated by the partial eta squared calculated as:  $\eta_p^2 = SS_{\text{effect}} / (SS_{\text{effect}} + SS_{\text{error}})$  (Cohen, 1988).

In a second step, we examined the correlations between recognition hits and neuropsychological measures (EM and EF composite scores) according to the active vs. passive navigation condition. Finally, partial correlations between age and false recognitions were performed while controlling for episodic memory and executive functioning. These partial correlations were performed only for the active navigation condition, given that no significant correlations between age and VR-based false recognitions were found in the passive condition.

### **3. Results**

#### *3.1. Performances on the experimental VR-based assessment.*

*Learning.* The 2 (Age: younger vs. older) X 2 (Navigation mode: active vs. passive) X 2 (trials: trial 1 vs. trial 2) mixed-design ANOVA showed a significant main effect of age,  $F(1, 56) = 13.14, p < .001, \eta_p^2 = .19$ , with better mean recall performances in younger adults compared to older adults; and a significant main effect of trials,  $F(1, 56) = 74.86, p < .0001, \eta_p^2 = .57$ , with recall performances increasing from trial 1 to trial 2, thus demonstrating a learning effect. There was no effect of navigation ( $p > .400$ ) and no interactions.

*Proactive interference.* The 2 (age) X 2 (navigation mode) X 2 (versions: free recall trial 1 version A vs. free recall version B) ANOVA showed a main effect of age,  $F(1, 56) =$

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

9.67,  $p < .01$ ,  $\eta_p^2 = .15$ ; with again better recall performances observed in younger adults than in older adults; and a main effect of versions,  $F(1, 56) = 16.42$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .23$ , with better free recall performances in trial 1 version A compared to the free recall of version B. Again, there was no significant effect of navigation ( $p > .400$ ) and no interactions.

*Semantic clustering.* The ANOVA only yielded a main effect of trials,  $F(1, 56) = 111.69$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .67$ , showing that the mean LBC score increased from trial 1 to trial 2 during the free recall of the target version. There was no significant effect of age ( $p > .800$ ), no effect of navigation ( $p > .500$ ), and no other significant interactions.

*Recognition hits.* The 2 (age) X 2 (navigation) ANOVA revealed a main effect of navigation,  $F(1, 56) = 8.23$ ,  $p < .01$ ,  $\eta_p^2 = .13$ , showing better recognition performances in the active condition compared to the passive condition. Neither a significant effect of age ( $p > .06$ ) nor a significant interaction ( $p > .700$ ) were found.

*False recognitions.* The 2 (age) X 2 (navigation) X 2 (type of lures: source-based vs. gist-based) ANOVA revealed a significant main effect of age,  $F(1, 56) = 10.69$ ,  $p < .01$ ,  $\eta_p^2 = .16$ , showing that, overall, older adults were more susceptible to false recognitions than their younger counterparts. There was also a main effect of the type of lures,  $F(1, 56) = 18.23$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta_p^2 = .25$ , showing that source-based lures were more endorsed compared to gist-based lures. No main effect of navigation was found ( $p > .300$ ). However, we found a significant age X navigation interaction,  $F(1, 56) = 5.68$ ,  $p < .05$ ,  $\eta_p^2 = .09$ , revealing that active navigation reduced the susceptibility to false recognitions in the younger subjects while on the contrary, it increased the susceptibility to false recognitions in older adults; however, both older and younger adults had equally high susceptibility to false recognitions in the passive navigation condition. A trend was only observed for the three-way age X navigation X type of lures interaction,  $F(1, 56) = 3.15$ ,  $p = .08$ ,  $\eta_p^2 = .05$ , suggesting that in younger adults, active navigation likely helped to reduce the susceptibility to source-based lures while

their low proportion of gist-based false recognitions did not change between active and passive navigation, which closely replicates the results provided by Sauzéon et al. (2012). On the contrary, older adults were more likely to endorse both types of lures after an active navigation than after a passive one. There were no other significant interactions (see Table 2 for the VR-based performances).

(Insert Table 2 about here)

### *3.2. Cognitive correlates of VR-based recognition according to the active vs. passive conditions.*

Significant and positive correlations were found between recognition hits and both EM ( $r = .43$ ,  $p < .05$ ) and EF ( $r = .44$ ,  $p < .05$ ) in the active condition but not in the passive condition ( $p > .800$ , and  $p > .200$ ), respectively).

(Insert Table 3 about here)

### *3.3. Neuropsychological mediation of age-related differences in false recognition after active navigation*

For partial correlations, a VR-based false recognition measure was calculated as follows: total false recognitions = source-based false recognitions + gist-based false recognitions. Both EM ( $r = -.50$ ,  $p < .01$ ) and EF ( $r = -.50$ ,  $p < .01$ ) were correlated with false recognitions. As seen in Table 4, age was also significantly correlated with false recognitions ( $r = .57$ ,  $p < .001$ ). When controlling for the EM composite score, we found that the correlation between age and total false recognitions substantially diminished, however it was still significant ( $r = .42$ ,  $p < .05$ ). On the contrary, when controlling for executive functioning, this correlation diminished and was no longer significant ( $r = .34$ ,  $p > .07$ ). These partial

correlations show that only executive functioning makes a contribution toward age differences in false recognitions under the active navigation condition.

(Insert Table 4 here)

### **4. Discussion**

Two main goals guided the present study: first, we compared the influence of active and passive navigation and aging on specific episodic memory processes such as learning, PI, semantic clustering, recognition hits and false recognitions. Second, our purpose was also to examine the influence that executive functioning and memory may have on age-related differences in these memory processes under both active and passive navigation.

#### *4.1. Comparison of VR-based memory performances between active and passive navigation conditions*

We found significant age differences in free recall (i.e., for learning) and false recognitions, but not in PI, semantic clustering or recognition hits. These results replicate the age differences traditionally found using paper-pencil memory tests (Constantinidou & Baker, 2002; Craik & McDowd, 1987; Gollin & Sharp, 1988; Wegesin, Jacobs, Zubin, Ventura, & Stern, 2000) as well as those found in VR-based studies (Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001; Sauzéon et al., 2012). We did not obtain an age X version interaction which would demonstrate a greater susceptibility to PI in older adults than in younger adults. In fact, contrary to paradigms such as the AB-AC paired learning (Ebert & Anderson, 2009), higher PI in older adults is not always observed when tested using paradigms involving multiple free recall trials (Constantinidou & Baker, 2003; Ebert & Anderson, 2009; Hasher, Chung, May,

& Foong, 2002) for a number of reasons (e.g., the difference in procedure which influences a test's sensitivity to PI in some populations, a more conservative response criterion as compensation for poor inhibitory ability, etc.). Finally, and more interestingly, when comparing source-based false recognitions to gist-based false recognitions, the present study reported that the former were more endorsed by the subjects compared to the latter. This superiority effect of source-based over gist-based false recognition seems consistent across studies although only two studies directly compared the two types of lures using different materials and procedures (Pierce et al., 2005; Sauzéon et al., 2012). For example, in Pierce et al.'s study, endorsing source-based lures over gist-based lures appeared to be function of the level of processing while in Sauzéon et al.'s study and the present study, source-based lures are mostly perceptual in nature compared to gist-based lures, which were never studied.

We also reported two main findings regarding the effects of the navigation mode: First, irrespective of the age group, active navigation had a beneficial effect on recognition hits compared to passive navigation but there were not any significant differences between the two navigation modes on semantic clustering and PI. Second, as demonstrated by the age X navigation interaction, active navigation helped to reduce false recognitions in younger adults but had an opposite effect in older adults, thereby increasing their susceptibility to false recognitions (once again mostly source-based false recognitions, although the three-way age X navigation X type of lure interaction only yielded a trend toward significance). We explain both findings in terms of the item-specific/relational processing distinction (Hunt & Einstein, 1981) which predicts that manipulations designed to enhance item-specific processing highly benefit episodic memory, and mostly recognition memory (McCabe et al., 2004; Thomas & Sommers, 2005), but not tasks depending on relational information (Peterson & Mulligan, 2010). Indeed, in the present study, active navigation only enhanced performances on tasks mainly relying on item-specific processing such as recognition but not on relational

processing (i.e., semantic clustering). We therefore replicated the previous findings by Sauzéon et al. (2012) and we suggest that this pattern of effects closely resembles those found using the SPT paradigm. In fact, like SPT, active navigation also involves planning abilities combined with a volitional motor control directed toward objects and locations, which also helps to focus on item-specific information according to Engelkamp & Dehn (2000). However, compared to our previous study, the present findings also suggest that if active navigation only enhances distinctiveness then this beneficial effect can be tenuous for tasks depending on both item-specific and relational processing such as free recall (Burns, 1989). Our results suggest that active navigation may be akin to the enactment effect but only to a limited extent, which would partially confirm the initial suggestion made by Brooks et al. (1999). However, two main differences should be noted between their study and ours: first, they only found a beneficial effect of active navigation on spatial memory but not on object memory and second, the participants incidentally encoded objects and locations during their navigation. By contrast, and in line with von Stülpnagel & Steffens (2012), our findings instead suggest that a) active navigation induces better recognition memory for objects in a familiar environment (in the present case, the familiarity is induced by repeated exposure to an environment), and b) the beneficial effect of active navigation is obtained after an intentional encoding instruction as in von Stülpnagel & Steffens's study, suggesting overall that the active navigation effect does not depend on the type of encoding instructions.

Concerning our second main finding, demonstrated by the age X navigation interaction, this interpretation further prevails since active navigation significantly reduced the proportion of false recognitions in younger adults, showing a typical mirror effect (i.e., enhancing item-specific information increases recognition hits and reduces false recognitions, Guntre, Bodner, & Azad, 2007; McCabe et al., 2004) but not in older adults. In fact, the older group made more false recognitions after active navigation. This finding is unexpected and

intriguing considering that several studies have reported reduced false recognitions when item-specific information is provided but conversely, this result makes sense when examined in light of studies reporting an absence of any beneficial effect of distinctiveness provided during encoding when assessing false recognitions using verbal stimuli (e.g., Butler et al., 2010; Smith, Lozito, & Bayen, 2005) or spatial memory errors in 3D-virtual environments (Taillade et al., 2013). Active navigation consists of free and self-paced explorations of rooms and the objects within, thus it certainly implies self-initiating associations among objects, encoding their distinctive features (e.g., color, shapes, and spatial locations) and binding them with motor information. However, as we already mentioned, planning and motor control are also needed for that purpose. Deficits in self-initiated processes ( Craik & Rose, 2012), binding processes (Old & Naveh-Benjamin, 2008) and planning and motor control (for a review see Seidler et al., 2010) are well-known in older adults but the present design was not intended to elucidate if some or all of them induced navigation-related false recognitions in older adults. However, they are all considered to tap executive functioning (Gershberg & Shimamura, 1995; Glisky & Kong, 2008) and this possibility was further examined with correlations and mediation analyses.

#### *4.2. Cognitive mechanisms of age differences in active navigation-related memory effects*

Accordingly, we found that correct recognitions as well as false recognitions were equally and significantly linked with EF and EM only in the active navigation group but not in the passive navigation group, which is consistent with the idea that correct recognition relies on the medial temporal lobe as well as on the prefrontal cortex, both of which are involved in item-specific recollection (Davidson & Glisky, 2002; Davachi, 2006). The relationship of these medial temporal and frontal measures with false recognitions is also

consistent with findings of overlapping neural correlates between true and false memories (Dennis et al., 2008; Garoff-Eaton et al., 2007). More importantly, we also found that only executive functioning made a significant contribution to age-related effects on false recognitions after active navigation. This contribution of executive functioning to active navigation is consistent with studies typically reporting better memory performances when active navigation either consists of planning/making decisions with regards to goal-directed movements or in combined planning/decision-making and motor control but not when motor control is considered separately (Bakdash, Linkenauger, & Profitt, 2008; Plancher, Barra, Orriols, & Piolino, 2013; Stüpnagel & Steffens, 2012). In addition, this finding is in line with previous studies examining mechanisms underlying older adults' susceptibility to false recognitions (e.g., Davidson & Glyski, 2002; McCabe, Roediger, McDaniel, & Balota, 2009; Plancher, Guyard, Nicolas, & Piolino, 2009) as well as with neuropsychological evidence from patients with frontal lesions exhibiting higher susceptibility to false recognitions, specifically due to an impaired source-monitoring (Alexander, Stuss, & Fansabedian, 2003; Pierce et al., 2005). Pierce et al. (2005) showed for instance that contrary to older adults who endorsed both source-based and gist-based false recognitions irrespective of the level of processing, younger adults were able to reduce their susceptibility to source-based false recognitions after deep processing, which may have perhaps enhanced their focus on item-specific information. Additionally, these authors advanced the hypothesis that executive difficulties in older adults generate increased post-retrieval monitoring failure especially when several sources are at stake in a recognition test (target, source lure, gist lure). In fact, it is known that older adults perform poorly on tasks assessing source memory, which has been related to executive functioning and to the prefrontal cortex (e.g., Craik, Morris, Morris, & Loewen, 1990; Rajah, Languay, & Valiquette, 2010). When provided with item-specific processing, several studies also showed increased false recognitions specifically in low



executive functioning/working memory but not in high functioning older adults, consistent with a source-monitoring deficit (Butler et al., 2010; Geraci et al., 2007). We did not specifically control for high and low executive functioning among the actively navigating older participants due to a small sample size and to our experimental design, but such results may be explained by a potentially lower functioning subject pool of older adults on average in our study. Taken together, our findings imply that active navigation enhances item-specific processing in older adults for tasks with low demands in executive functioning (i.e., recognition) but not for tasks highly subserved by executive functioning such as post-retrieval source-monitoring in distinguishing between different types of lures and targets as pointed out by Butler et al. (2010).

### *4.3. Conclusion*

To conclude, our study mainly focused on memory for objects in a visually rich and complex environment that simulates a real life situation (e.g., visiting an apartment) using VR. We demonstrated main age effects on learning and false recognitions but not on semantic clustering, PI or correct recognitions. Furthermore, irrespective of the age group, better recognition performances were observed after an active navigation than after a passive one. Our findings draw important implications regarding the nature of active navigation: It can be beneficial for object memory under intentional encoding instructions, and much like the enactment effect it also proves beneficial for older adults but only to some extent. In other words, it enhances their correct recognition, but unlike manipulations based on item-specific processing, it also increases their false recognitions compared to younger adults. This differential effect of active navigation in older and younger adults was mainly accounted for by executive functioning, consistent with the idea of an additional burden placed by active navigation on source-monitoring. Some limits to the present study should also be noted: First,

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

we had small sample sizes in each group, perhaps lowering the power of the study to sufficiently detect some effects. Second, unlike some recent studies, active navigation in our study did not separate the motor component from the planning/decision-making component, on which aging could have a differential effect. Finally, unlike Butler et al. (2010), the present study did not control for the level of executive functioning in older adults, which may be a source of variance in their susceptibility to active navigation-related false recognitions. Further studies are therefore necessary to elucidate these issues.

## References

- Alario, F.-X., & Ferrand, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for French: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *31*, 531–552.
- Alexander, M.P., Stuss, D.T., & Fansabedian, N. (2003). California Verbal Learning Test: performance by patients with focal frontal and non-frontal lesions. *Brain*, *126* (Pt 6), 1493–1503.
- Bakdash, J. Z., Linkenauger, S. A., & Profitt, D. (2008). Comparing decision-making and control for learning a virtual environment: Backseat drivers learn where they are going. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, *52*, 2117–2121.
- Basden, B.H., Basden, D.R., & Bartlett, K. (1993). Memory and organization in elderly subjects. *Experimental Aging Research*, *19* (1), 29–38.
- Braver, T.S., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F.I.M. Craik & T.A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (311–372). Hove: Psychology 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*, 65–78.
- Brooks, B.M., & Gardiner, J.M. (1994). Age differences in memory for prospective compared with retrospective subject-performed tasks. *Memory & Cognition*, *22*(1), 27–33
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free recall performance. *Psychology and Aging*, *11*, 3–9.
- Burns, D. J. (1989). Proactive interference: An item-specific versus relational processing account. *Journal of Memory and Language*, *28*, 345–359.
- Butler, K.M., McDaniel, M.A., McCabe, D.P., & Dornburg, C.C (2010). The influence of distinctive processing manipulations in older adults' false memory. *Aging, Neuropsychology, & Cognition*, *17* (2), 129–159.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioural sciences*. Academic Press,
- Cohen, R. L. (1989). Memory for action events: The power of enactment. *Educational Psychological Review*, *1*, 57–80.
- Constantinidou, F., & Baker, S. (2002). Stimulus modality and verbal learning performance in normal aging. *Brain and Language*, *82*, 296–311.
- Craik, F.I.M., & McDowd, J.M. (1987). Age differences in recall and recognition. *Journal Of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *13*, 473–479.
- Craik, F.I.M., & Rose, N.S. (2012). Memory encoding and aging: A neurocognitive perspective. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36* (7), 1729–1739.
- Craik, F.I.M., Morris, L.W., Morris, R.G., & Loewen, E.R. (1990). Relations between source amnesia and frontal lobe functioning in older adults. *Psychology and Aging*, *5* (1), 148–151.
- Davachi, L. (2006). Item, context, and relational episodic encoding in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, *16*, 693–700.

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

- Davidson, P.S.R., & Glisky, E.L. (2002). Neuropsychological correlates of recollection and familiarity in normal aging. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 2, 174–186.
- Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., & Ober, B.A. (1987). *California Verbal Learning Verbal Test: adult version*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Dennis, N.A., Kim, H., & Cabeza, R. (2007). Effects of aging on true and false memory formation: An fMRI study. *Neuropsychologia* 45, 3157–3166
- Dijkstra, K., & Kaschak, M.P. (2006). Encoding in verbal, enacted and autobiographical tasks in young and older adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(8), 1338-45.
- Ebert, P.L., & Anderson, N.D. (2009). Memory interference in young adults, healthy older adults, and older adults with amnesic Mild Cognitive Impairment. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 15(1), 83-93.
- Engelkamp, J. (2001). Action memory: A system-oriented approach. In H. D. Zimmer, R. L. Cohen, M. J. Guynn, J. Engelkamp, R. Kormi-Nouri, & M. A. Foley (Eds.), *Memory for action: A distinct form of episodic memory?* (pp. 144–150). New York: Oxford University Press.
- Engelkamp, J., & Dehn, D. M. (2000). Item and order information in subject-performed tasks and experimenter performed tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26, 671–682.
- Engelkamp, J., Zimmer, H.D., Mohr, G., & Sellen, O. (1994). Memory of self-performed tasks: Self-performing during recognition. *Memory & Cognition*, 22, 34-39.
- Feyereisen, P. (2009). Enactment effects and integration processes in younger and older adults' memory for actions. *Memory*, 17(4), 374-85.
- Foley, M. A., & Ratner, H. H. (2001). Role of action-based structures in activity memory. In H. Zimmer, R. Cohen, & others (Eds.), *Memory for action* (pp. 112-135). New York: Oxford University Press
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., & McHugh, P.R. (1975). "Mini-Mental State": A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 189-198.
- Garoff-Eaton, R., Kensinger, E.A., & Schacter, D. (2007). The neural correlates of conceptual and perceptual false recognition. *Learning & Memory*, 14, 684-692.
- 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, 409–420.
- Geraci L, McDaniel MA, Manzano I, Roediger HL 3rd. The influence of age on memory for distinctive events. *Memory & Cognition*, 37(2), 175-80.
- Gershberg, F.B. & Shimamura, A.P. (1995). Impaired use of organizational strategies in free recall following frontal lobe damage. *Neuropsychologia*, 13, 1305–1333
- Glisky, E.L., & Kong, L.L. (2008). Do young and older adults rely on different processes in source memory tasks? A neuropsychological study. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 34 (4), 809-822.
- Gollin, E.S., & Sharps, M.J., (1988). Facilitation of free recall by blocking depends on stimulus type. *Memory & Cognition*, 16 (6), 539-544.

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

- Guntre, R.W., Bodner, G.E., & Azad, T. (2007). Generation and mnemonic encoding induce a mirror effect in the DRM paradigm. *Memory & Cognition*, 35 (5), 1083-1092.
- Hahm, 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, 305–308.
- Hasher, L., Chung, C., May, C. P., & Foong, N. (2002). Age, time of testing, and proactive interference. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56, 200–207.
- Hunt, R. R., & Einstein, G. O. (1981). Relational and item-specific information in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20, 497-514.
- Jansen-Osmann, P., & Fuchs, P. (2006). Wayfinding behavior and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of landmarks. *Experimental Psychology*, 53 (3), 171-181.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203–220.
- Luria, A. (1962). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Books
- McCabe DP, Roediger HL 3rd, McDaniel MA, & Balota DA. (2009). Aging reduces veridical remembering but increases false remembering: neuropsychological test correlates of remember-know judgments. *Neuropsychologia*, 47 (11), 2164-2173.
- McCabe, D.P., Presmanes, A.G., Robertson, C.L., & Smith, A. (2004). Item-specific processing reduces false memories. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11 (6), 1074-1079
- McDaniel, M. A., Einstein, G. O., & Jacoby, L. L. (2008). New considerations in aging and memory: The glass may be half full. In F. I. M. Craik & T. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (3rd ed., pp. 251–310). New York: Psychology Press.
- McDonald, S.W.S., Cervenka, S., Farde, L., Nyberg, L., & Bäckman, L. (2009). Extrastriatal dopamine D2 receptor binding modulates intraindividual variability in episodic recognition and executive functioning. *Neuropsychologia*, 47 (11), 2299-2304.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, 787–796.
- Monchi, O., Ko, J.H., & Strafella, A.P. (2006). Striatal dopamine release during performance of executive functions: A [(11)C] raclopride PET study. *Neuroimage*, 15, 33 (3), 907-912.
- Nyberg, L., Persson, J., & Nilsson, L.G. (2002). Individual differences in memory enhancement by encoding enactment: relationships to adult age and biological factors. *Neuroscience and Behavioral Review*, 26 (7), 835-839.
- Old, S.R., & Naveh-Benjamin, M. (2008). Differential effects of age on item and associative measures of memory: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 23 (1), 104-118.
- Péruch, P., & Wilson, P. N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, 5, 218–227.
- Peterson, D. J., & Mulligan, N. W. (2010). Enactment and retrieval. *Memory & Cognition*, 38, 233–243.

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

- Pierce, B.H., Sullivan, A.L., Schacter, D.L., & Budson, A.E. (2005). Comparing source-based and gist-based false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, *19* (4), 411-419.
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: a virtual reality study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66* (5), 895-909.
- Plancher, G., Guyard, A., Nicolas, S., & Piolino, P. (2009). Mechanisms underlying the production of false memories for famous people's names in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, *47*, 2527-2536.
- 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.
- Rajah, M.N., Languay, R., & Valiquette, L. (2010). Age-related changes in prefrontal cortex activity are associated with behavioural deficits in both temporal and spatial context memory retrieval in older adults. *Cortex*, *46* (4), 535-549.
- Rönnlund, M., Nyberg, L., Bäckman, L., & Nilsson, L.-G. (2003). Recall of subject-performed tasks, verbal tasks, and cognitive activities across the adult life span: Parallel age-related deficits. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *10*, 182-201.
- Salamone, J.D. (1992). Complex motor and sensorimotor functions of striatal and accumbens dopamine: involvement in instrumental behavior process. *Psychopharmacology*, *107*, 160-174.
- Sauzéon, H., Arvind Pala, P., Larrue, F., Wallet, G., Déjos, M., Zheng, X., Guitton, P., & N'Kaoua, B. (2012). The use of virtual reality for episodic memory assessment: effects of active navigation. *Experimental Psychology*, *59* (2), 99-108.
- Seidler, R.D. (2010). Neural correlates of motor learning, transfer of learning, and learning to learn. *Exercise and sport science reviews*, *38*(1), 3-9.
- Sharps, M.J., Day, S.S., Nunes, M.A., Neff, A., & Woo, E. (2004). Relational and imageric recall in young and older adults under conditions of high task demands. *Current Psychology: Developmental, Learning, Personality, Social*, *22* (4), 379-393.
- Smith, R. E., Lozito, J. P., & Bayen, U. (2005). Adult age differences in distinctive processing: The modality effect on false recall. *Psychology and Aging*, *20*, 486-492.
- Stricker, J.L., Brown, G.G., Wixted, J., Baldo, J.V., & Delis, D.C. (2002). New semantic and serial clustering indices for the california verbal learning test-second edition: background, rationale, & formulae. *Journal of The International Neuropsychological Society*, *8*, 425-435.
- Stroop J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 643-662.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Arvind Pala, P., Déjos, M., Larrue, F., Gross, C., & N'Kaoua, B. (2013). Age-related wayfinding differences in real large scale environments : Detrimental motor control effects during spatial learning are mediated by executive decline ? *PLoS ONE*, *8*(7): e67193. DOI:10.1371/journal.pone.0067193.
- Thomas, A.K., & Sommers, M.S. (2005). Attention to item-specific processing eliminates age effects in false memories. *Journal of Memory and Language*, *52* (1), 71-86.
- Troyer, A. K., Graves, R. E., & Cullum, C. M. (1994). Executive functioning as a mediator of the relationship between age and episodic memory in healthy aging. *Aging and Cognition*, *1*, 45-53.

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47, 599–604.
- Vandierendonck, A., Kemps, E., Fastame, M.C., & Szmalec, A. (2004). Working memory components of the Corsi Blocks task. *British Journal of Psychology*, (Pt 1), 57-79.
- von Stülpnagel, R., & Steffens, M. C. (2012, February 13). 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. doi: 10.1037/a0027133
- Wallet, G., Sauze'on, H., Rodrigues, J., & 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., Arvind Pala, P., 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.
- Wegesin DJ, Jacobs DM, Zubin NR, Ventura PR, Stern Y. (2000). Source memory and encoding strategy in normal aging. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22 (4), 455-464.
- Wilson, P. N. (1999). Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or memory for objects. *Environment & Behavior*, 31, 752–763.
- Wilson, P. N., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active versus passive processing of spatial information in a computer-simulated environment. *Ecological Psychology*, 9, 207–222.

AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

Table 1. Demographic and neuropsychological characteristics of the participants as a function of age and the navigation condition. Standard deviations are in parenthesis. Only significant effects are reported for the 2 (age) X 2 (navigation) ANOVAs.

	Younger (n = 30)		Older (n = 30)		ANOVAs (age X navigation)
	Active (n = 15)	Passive (n = 15)	Active (n = 15)	Passive (n = 15)	Age effects
<i>Demographic variables</i>					
Age	22.65 (1.94)	21.91 (2.21)	65.67 (3.42)	67.73 (6.72)	F (1,56) = 1807.07, p<.0001, $\eta_p^2 = .97$
Education level	15.13 (1.51)	14.53 (1.41)	13.87 (2.36)	14.13 (2.13)	F (1,56) = 2.90, <i>n.s.</i>
NT	12.73 (3.77)	13.07 (5.43)	7.93 (3.26)	10.00 (5.87)	F (1,56) = 10.46, p<.01, $\eta_p^2 = .16$
SSQ-TS	7.25 (8.18)	6.73 (10.69)	11.97 (16.13)	4.22 (5.94)	F (1,56) = .15, <i>n.s.</i>
MMSE	-	-	28.93* (.96)	29.13* (1.55)	
<i>Neuropsychological tests</i>					
Episodic memory					
CVLT Free recall trial 5	14.80 (.94)	14.40 (1.76)	13.07 (1.98)	13.85 (2.05)	F (1,56) = 6.48, p<.05, $\eta_p^2 = .10$
CVLT Recognition hits	15.53 (.64)	15.27 (.80)	14.53 (1.92)	14.53 (1.99)	F (1,56) = 5.19, p<.05, $\eta_p^2 = .10$
Executive Functioning					
Mental Rotation	22.20 (7.24)	18.27 (9.26)	8.87 (5.63)	10.10 (6.64)	F (1,56) = 32.38, p<.0001, $\eta_p^2 = .37$
Stroop errors	.67 (.98)	.07 (.26)	2.13 (2.03)	1.80 (3.05)	F (1,56) = 10.62, p<.01, $\eta_p^2 = .16$

Note: *n.s.* = non-significant; NT= New Technology; SSQ-TS= Simulator Sickness Questionnaire-Total Score; MMSE= Mini-Mental Status Examination; CVLT = California Verbal Learning Test; \* The active and passive older adults group were compared using a Student *t*-test, which did not show a significant between-group difference, *t* (28) = -.42, *n.s.*



## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

Table 2. VR-based memory performances on each process as a function of age and the navigation condition. Standard deviations are in parenthesis.

<i>VR-based memory processes</i>	Younger (n = 30)		Older (n = 30)	
	Active (n = 15)	Passive (n = 15)	Active (n = 15)	Passive (n = 15)
<b>Learning</b>				
Version A Trial 1	.77 (.10)	.74 (.13)	.67 (.15)	.66 (.11)
Version A Trial 2	.89 (.08)	.86 (.12)	.79 (.13)	.77 (.09)
<b>Proactive Interference</b>				
Version A Trial 1	.77 (.10)	.74 (.13)	.67 (.15)	.66 (.11)
Version B Trial 1	.72 (.06)	.68 (.19)	.60 (.14)	.59 (.14)
<b>Semantic Clustering</b>				
Version A Trial 1	17.45 (4.09)	16.73 (7.90)	15.76 (4.86)	18.99 (4.91)
Version A Trial 2	25.80 (5.36)	24.08 (7.57)	22.86 (5.37)	25.52 (4.70)
Recognition hits	.94 (.05)	.88 (.09)	.90 (.05)	.85 (.09)
<b>False recognitions</b>				
Source-based	.13 (.12)	.27 (.20)	.41 (.29)	.25 (.26)
Gist-based	.08 (.10)	.06 (.06)	.23 (.21)	.14 (.15)

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

Table 3. Pearson's correlations between VR-based recognition hits and EM and EF according to active and passive navigation.

	Recognition X EM	Recognition X EF
Active navigation	<b>.43*</b>	<b>.44*</b>
Passive navigation	-.02	.20

Note.\* p<.05

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

Table 4. Zero-order Pearson's correlation between age and false recognitions (FRs) after active navigation, followed by the same correlation controlled for EM and EF.

	FRs X Age
Zero-order correlation	<b>.57***</b>
Partial correlation	
EM	.42*
EF	.34

Note.\*p<.05; \*\*\*p<.001

## AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY

Figure 1. A view of the kitchen, the living room, the bedroom and the bathroom are respectively presented in a, b, c, and d.

AGING, ACTIVE NAVIGATION AND MEMORY



a.



b.



c.



d.

### III. Résumé du chapitre VI

Dans les dernières études, nous avons proposé d'examiner l'effet de la navigation active sur les processus de mémoire quotidienne évalués à l'aide du HOMES test. Nos principaux résultats révèlent :

- *Concernant les sujets jeunes (sur les études 3 et 4) :*
  - Un effet bénéfique de la navigation active sur les reconnaissances correctes et sur la susceptibilité aux fausses reconnaissances
  - Un bénéfice de la navigation active parfois constaté sur le rappel libre (étude 3) et parfois non constaté (étude 4).
  - Une absence d'effet de la navigation active sur les indicateurs de regroupement sémantique et d'interférence proactive.
  
- *Concernant les sujets âgés (étude 4)*
  - Un effet bénéfique de la navigation active sur les reconnaissances correctes, et ce, de manière identique à ce qui est observé pour le sujet jeune.
  - Une absence d'effet de la navigation active sur les indicateurs de regroupement sémantique, d'interférence proactive et de rappel libre, comme pour le sujet jeune.
  - Un effet délétère de la navigation active sur les fausses reconnaissances est obtenu chez le sujet âgé, à l'inverse du sujet jeune.
  - L'effet bénéfique sur la reconnaissance est positivement corrélé aux capacités exécutives et mnésiques quelque soit l'âge ; et l'effet délétère sur la sensibilité aux fausses reconnaissances des âgés est exclusivement médié par le fonctionnement exécutif.

Au total, un effet positif de la navigation active est obtenu sur les performances de reconnaissance correcte et, ce bénéfice est inchangé avec l'âge et est corrélé au fonctionnement exécutif et mnésique. Par contre, la propension des âgés aux fausses reconnaissances est aggravée après une navigation active, et cette aggravation est liée à leurs difficultés dysexécutives.

De plus, nos résultats indiquent qu'une navigation active n'a pas d'influence sur les mesures de rappel libre, de regroupement sémantique, et d'interférence proactive.

que nous avons mis en évidence dans les études précédentes, à savoir le rappel libre au cours des essais successifs d'apprentissage, l'interférence proactive, la récupération en termes de

reconnaissance et les fausses reconnaissances. Dans les deux études, les jeunes augmentaient leur proportion de reconnaissances correctes et réduisaient leur susceptibilité aux fausses reconnaissances, traduisant ainsi un effet miroir, tandis que leur performance restait inchangée quelque soit le mode de navigation (active vs. passive) sur les mesures de regroupement sémantique et d'interférence proactive. Dans l'étude 4, nous avons voulu vérifier si l'effet de l'âge sur ces indices était réduit, voire éliminés, lorsqu'une telle navigation active était utilisée lors de la phase d'encodage. Comme nous nous y attendions, les âgés bénéficièrent de la navigation active sur la mesure de reconnaissance correctes, en revanche une telle navigation a eu pour conséquence une augmentation des fausses reconnaissances contrairement à ce qui était attendu. Le fonctionnement exécutif semble sous-tendre cette plus grande susceptibilité des âgés aux fausses reconnaissances uniquement lors de la navigation active mais pas lors de la navigation passive.

L'ensemble de ces résultats est discuté plus en détail dans le chapitre VII et notamment à la lumière du cadre théorique fourni par la distinction « traitement item-spécifique vs. Relationnel ».

## Chapitre VII

### Discussion-Conclusion

La présente thèse s'était donnée pour objectifs de s'interroger sur le fonctionnement quotidien de la mémoire épisodique, notamment à travers ses processus et de la manière dont ils sont affectés dans le vieillissement normal. Pour cela, nous avons utilisé le paradigme d'apprentissage multi-essai implémenté au sein d'un dispositif RV, appelé le HOMES test dont l'environnement virtuel permet de simuler une situation de la vie quotidienne telle que la visite d'un appartement. Dans notre vie quotidienne, rien ne se fait sans l'apport de la motricité volontaire, interagissant avec notre cognition. Dans ce cadre, nous nous sommes également interrogés sur l'interaction entre cet aspect moteur de la volition sous la forme d'une navigation active et les processus mnésiques opérant à l'encodage et à la récupération.

Plus précisément, en adoptant essentiellement une approche vérisimilaire (études 1 à 4) nous avons voulu examiner si les effets de l'âge observés avec les tests traditionnels tels que le CVLT (Delis et al., 1987 ; 2000) ou les procédures de laboratoires (e.g., Moffat & Resnick, 2002) sont retrouvés en utilisant une évaluation plus écologique de la mémoire épisodique sur des processus tels que l'apprentissage, le regroupement sémantique, l'interférence proactive, le bénéfice lié à la reconnaissance, ainsi que la susceptibilité aux fausses reconnaissances. Nous y avons également intégré la véridicalité (études 1 et 2) en examinant la relation de ces performances objectives avec les auto-évaluations subjectives de la mémoire au moyen de la forme abrégée du Questionnaire d'Auto-évaluation de la Mémoire ou QAM (Clément et al., 2008). Dans les deux dernières études, l'approche vérisimilaire a été appuyée non seulement en apportant une complexité visuelle à l'environnement, qui simulait ainsi une situation naturelle et quotidienne, mais également en y intégrant une interaction motrice permettant d'examiner expérimentalement le bénéfice apporté par une navigation active comparée à une navigation passive sur ces processus mnésiques (*étude 3*), notamment dans le vieillissement normal (*étude 4*).

En conséquence, après un bref récapitulatif des résultats des ces études, le présent chapitre s'attachera à discuter d'abord les résultats relatifs aux effets du vieillissement sur les processus mnésiques précédemment mentionnés et les mécanismes cognitifs les sous-tendant



(études 1 et 2), puis nous nous tournerons vers les résultats des études sur l'effet de la navigation active et ses mécanismes cognitifs. Les perspectives et les limites de notre travail seront également présentées. Enfin, une conclusion générale viendra clôturer la présente thèse.

## **I. Profil mnésique dans le vieillissement normal : études comparative des sujets âgés sains et des patients avec traumatisme crânien ou avec MA.**

Dans les deux premières études, nous avons soumis des jeunes adultes et des âgés à une procédure de rappels libres multi-essais (multi-trial free recall paradigm, Wixted, 2007) implémenté au sein d'un dispositif RV nommé le HOMES test. Cette procédure, largement reprise par les tests traditionnels comme le CVLT ou le RI-RL/16, car pratique pour évaluer en une seule fois plusieurs processus mnésiques à l'encodage mais aussi à la récupération en recueillant un certain nombre d'indicateurs quantitatifs relatifs. Le profil mnésique des âgés a été directement comparé à celui des patients avec traumatisme crânien modéré à sévère ainsi qu'aux patients avec MA au stade léger à modéré et leur mécanismes cognitifs ont été étudiés par des analyses de corrélations et de médiation.

### **1. Synthèse des résultats des études 1 et 2**

Les deux études ont permis de mettre en évidence :

- 1) Un profil « située » des effets de l'âge sur les mécanismes mnésiques à l'étude avec : une différence liée à l'âge sur le rappel libre et une susceptibilité augmentée aux fausses reconnaissances. Aucune majoration de l'effet d'interférence n'a été constatée dans les deux études, ni de différence significative entre les jeunes et les âgés sur la mesure de regroupement sémantique. Enfin, l'effet de l'âge sur la reconnaissance correcte a été retrouvé dans la seconde étude mais pas dans la première.
- 2) Ce même profil a été retrouvé chez les jeunes patients traumatisés crâniens (*étude 1*), en revanche les patients avec MA (*étude 2*) présentaient des performances largement déficitaires sur toutes les mesures recueillies.
- 3) Si les effets de l'âge sur le rappel libre lors de l'apprentissage, la reconnaissance et les fausses reconnaissances étaient surtout expliqués par un déclin du fonctionnement exécutif, la mémoire épisodique expliquait plutôt la variance dans les performances des patients, qu'il s'agisse de ceux souffrant d'un TC ou d'une MA.

- 4) Enfin, dans les deux études, le rappel libre (*étude 1 et 2*) et la reconnaissance (*étude 2*) étaient corrélés avec la plainte mnésique chez les âgés alors que cette corrélation n'était pas retrouvée chez les patients.

Chacun de ces trois points seront discutés dans les sections suivantes.

## **2. Mémoire quotidienne dans le vieillissement normal, le traumatisme crânien et la maladie d'Alzheimer**

### *2.1. Les effets de l'âge sur les performances mnésiques basées sur le HOMES test*

- L'apprentissage et le rappel libre

Le déclin sur les performances de rappel libre chez les âgés est rapporté par les études utilisant aussi bien les tests traditionnels que les procédures de laboratoire similaires ou différentes (Delis et al., 2000 ; Hasher et al., 2002 ; Ebert & Anderson, 2009 ; Schacter & Addis, 2007). Toutefois, cela n'altère pas leur capacité d'apprentissage puisque les performances de rappel libre augmentent au cours des essais, même si la totalité des items ne sont pas récupérés au dernier essai (Constantinidou & Baker, 2002). Nous avons retrouvé cette caractéristique des âgés dans nos deux études. Toutefois, il a été montré qu'avec un nombre suffisant d'essais les âgés arrivent à rappeler la totalité des items, notamment dans les études qui contrôlent le niveau d'encodage afin d'examiner l'hypothèse d'un déficit de récupération où le critère d'apprentissage initial est de 100 % (e.g., Kahana & Wingfield, 2000). Ce type de résultat a aussi été montré en utilisant la RV en utilisant une procédure de laboratoire telle que le Morris Water Maze ou les labyrinthes (Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001 ; Moffat & Resnick, 2002) que des tâches de mémoire spatiale inspirés du CVLT dans un environnement proche de la vie quotidienne (Widmann, Beinhoff, & Riepe 2012).

- Rappel libre vs. Reconnaissance

Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné dans le *chapitre III*, la reconnaissance est meilleure chez les âgés, mettant en évidence un bénéfice tout à fait évident. Cependant, la question est de savoir si a) ce bénéfice est plus important chez les âgés que chez les jeunes et b) si les performances de reconnaissances sont normalisés par rapport aux jeunes (autrement dit si l'effet de l'âge est éliminé sur une tâche de reconnaissance). Ces questions ont été

abordées entre les années 70 et 90 avec peu d'études comparant directement les deux tâches de récupération. Une réponse en utilisant une procédure classique d'apprentissage de listes de mots semble venir de la toute récente étude de Danckert & Craik (in press), qui montre qu'en dépit d'un bénéfice apporté par la tâche de reconnaissance, les performances sur celle-ci n'éliminent pas la différence entre les jeunes et les âgés. Nous avons également retrouvé ce résultat dans notre étude 1, où la performance de reconnaissance corrigée pour les biais de réponse était inférieure à celle des jeunes. En effet, les âgés reconnaissaient certes plus d'items cibles en comparaison au rappel libre pour lequel plus d'efforts cognitifs sont nécessaires afin de rechercher l'information en mémoire (Craik & McDowd, 1987), mais ils commettaient également plus de fausses reconnaissances comparés aux jeunes. Nous n'avions pas corrigé la reconnaissance des âgés dans *l'étude 2*, mais un score de reconnaissance plus faible des âgés comparés aux jeunes ajouté aux fausses reconnaissances élevé laisse également penser une configuration semblable à *l'étude 1*. En effet, les scores de reconnaissances correctes (non-corrigées) et de fausses reconnaissances sont assez proches dans les deux études (*étude 1* : reconnaissance correcte,  $M = .78$ ,  $SD = .11$  ; fausses reconnaissances,  $M = .22$ ,  $SD = .19$ ; *étude 2* : reconnaissance correcte,  $M = .79$ ,  $SD = .91$  ; fausses reconnaissances,  $M = .21$ ,  $SD = .18$ , voire tableaux 2 pour chacune de deux études). Le rappel libre étant considéré comme pouvant mobiliser les processus item-spécifiques (entre-autre) tout comme la reconnaissance, l'effet de l'âge persistant sur les fausses reconnaissances en plus de celui sur le rappel libre peut soutenir l'hypothèse d'un déclin sélectif du traitement item-spécifique avec le vieillissement normal (Sauzón et al., 2001 ; voire Smith, 2006, pour une revue).

- Susceptibilité aux fausses reconnaissances

La propension des âgés sains à commettre plus de fausses reconnaissances est connue, qu'il s'agisse de fausses reconnaissances de sources ou de fausses reconnaissances sémantiques (Pierce et al., 2005 ; Israel & Schacter, 1997). Remarquons que nous n'avions obtenu un effet d'interaction entre l'âge et le type de leurre (source vs. sémantique) dans aucune des deux études, cependant dans les deux cas, la proportion de fausses reconnaissances de source était numériquement supérieure chez les âgés comparés aux jeunes. Ces résultats sont également en lien avec la seule autre étude qui, à notre connaissance, compare les deux types de fausses reconnaissances chez les âgés mais aussi chez les patients avec une MA (nous discuterons des performances de ces patients dans la section 2.2.), effectuée par Pierce et al. (2005). Les mécanismes cognitifs aboutissant à différentes formes de fausses reconnaissances sont à

l'heure actuelle peu connus mais le peu d'études semblent suggérer que le monitoring de la source serait nécessaire quel que soit le type de fausses reconnaissances, que les associés sémantiques soient activés automatiquement dans le réseau sémantique (selon la théorie de l'activation/monitoring, Gallo, 2006) ou qu'une plus grande similarité perceptuelle entre deux événements rendent leur discrimination plus difficile évoquant un traitement item-spécifique déficitaire (King et al., 2005 ; Garoff-Eaton et al., 2007). Dans nos deux études où deux événements sont similaires aussi bien sur le plan perceptif (appartement A et B) que sur le plan sémantique (les deux appartements partagent les mêmes catégories sémantiques), les deux hypothèses pourraient rendre compte d'une susceptibilité plus grande des âgés aux fausses reconnaissances. Ajoutant à cela, que la dernière hypothèse sous-entend que le défaut de discrimination de la source post-récupération des âgés serait la conséquence de l'appui marqué des âgés sur ce qui est en commun (traitement relationnel) entre les deux appartements plutôt que ce qui les distingue (traitement item-spécifique) (Hunt, 2012 ; Sauzéon et al., 2001)

- Susceptibilité à l'interférence proactive

Des auteurs ont suggéré que des performances pauvres sur les tâches de rappel libre et une susceptibilité plus forte aux fausses reconnaissances reflètent un déclin des processus stratégiques qui sous-tendrait ces tâches (Kuhl & Wagner, 2009 ; Moscovitch, 1992 ; Delis et al., 2000 ; Kramer et al., 2005), et l'ensemble de ces performances obtenues dans nos deux études semblent être en accord avec un tel point de vue si l'on considère que les âgés montrent par ailleurs des performances moindres par rapport aux jeunes sur les tests des fonctions exécutives (Braver & West, 2008). Ce type d'hypothèse considère également une plus grande sensibilité des âgés à l'interférence proactive comme reflétant un déclin du contrôle exécutif cependant nos deux études montrent une taille d'effet de faible amplitude chez les âgés (*étude 1* : trial 1version A –trial B. = .03 ; *étude 2* : trial 1version A –trial B. = .04). L'étude de Ebert & Anderson (2009), la première à notre connaissance à évaluer l'interférence chez les âgés et les jeunes en utilisant le CVLT, a également rapporté une taille de l'effet moins importante chez ces derniers comparés aux jeunes entre le rappel libre de l'essai 1 de la liste A et le rappel de la liste B (chez les âgés : liste A essai 1-liste B = .30 comparé à 1.1 chez les jeunes), mais cette différence n'était pas statistiquement significative. Les analyses quant à l'effet d'interférence proactive sur le CVLT n'ont pas été rapportés dans nos études, mais nous l'avons également calculé, montrant encore une fois un effet d'interférence moins important chez les âgés (*étude 1* : liste A essai 1-liste B = .60 ; *étude 2* :

trial 1version A –trial B. = 1.25). Cependant, cette même étude rapporte un effet d'interférence plus important chez les âgés comparés aux jeunes sur la tâche classique AB-AC aussi bien en termes de cycles d'apprentissage (essais) nécessaires pour atteindre un critère de 100 % mais aussi en termes de rappel correcte. Il semblerait donc que le paradigme d'apprentissage par essai multiple de rappel libre tel qu'utilisé par des tests traditionnels de mémoire épisodique manque de sensibilité suffisante pour détecter une telle susceptibilité à l'interférence proactive. D'ailleurs, Ebert & Anderson purent également montrer que l'effet d'interférence était similaire entre les âgés et les patients atteints de troubles mnésiques légers (amnesic Mild Cognitive Impairment ou aMCI) rendant ainsi compte du manque de sensibilité plus général d'une telle procédure.

Burns (1989, 2006) considère que, dans la mesure où le rappel libre est utilisé pour avoir une mesure de contraste entre l'essai 1 de la liste A et l'essai unique de la liste B, l'effet d'interférence peut être considéré comme dépendant à la fois du traitement item-spécifique et relationnel. Ainsi, si une plus grande sensibilité à l'interférence proactive est constatée chez les âgés, elle pourrait encore une fois être interprétée comme le résultat d'un plus grand appui sur le traitement relationnel en raison d'un déficit du traitement item-spécifique. À l'inverse, chez les jeunes, le traitement item-spécifique permettrait d'avoir un contrôle sur le traitement relationnel automatique (des associés sémantiques) suffisant pour amoindrir l'effet d'une interférence proactive. Comme mentionné plus haut, il est fort possible qu'un manque de sensibilité de la procédure du type CVLT ne permette pas de capturer ce déficit du traitement item-spécifique chez nos participants âgés. Et, l'utilisation d'une tâche AB-AC pourrait être mieux indiquée pour le révéler.

- Regroupement sémantique

Nous n'avons pas non plus observé de différence significative entre les jeunes et les âgés sur une mesure de stratégie d'encodage telle que le regroupement sémantique dans nos deux études. Ce résultat est en accord avec la préservation de la mémoire sémantique dans le vieillissement normal (voire Light, 1992 pour une revue). Comme nous l'avons déjà mentionné dans la discussion de nos deux articles, nous utilisons des catégories déjà visibles (chambre, salle de bain,...) à l'intérieur desquelles les objets cibles étaient « bloqués », c'est à dire présentés ensembles pour une même catégorie. Ce résultat peut donc être attribué à ce « blocking effect » qui serait une manière de rendre les associations entre les objets et les éléments contextuels plus évidentes (Wegesin et al., 2000), contrairement aux procédures dans lesquels les items sémantiquement liés ne sont présentés que dans un ordre pseudo-

randomisés. La réduction du nombre de regroupements dans le vieillissement est interprétée classiquement comme l'atteinte des processus de traitement stratégique des items à l'encodage mais également à la récupération (Craik & McDowd, 1987; Sauzéon et al., 2001). Aussi, dans la plupart des études pré-citées, le matériel à apprendre était verbal. Dans notre cas, nous avons présenté un matériel riche visuellement et scénarisé dans un contexte sémantique surappris (organisation des pièces d'un domicile). Ceci pourrait également constituer un avantage pour nos âgés, leurs performances pouvant alors être le résultat aussi bien d'un blocking effect que de l'effet de supériorité de la modalité visuelle, fournissant la structure de traitement stratégique nécessaire aux âgés pour initier un traitement profond favorisant le rappel et le nombre de regroupement catégoriel lors du rappel, et témoignant d'une préservation des traitements relationnel de nature sémantique dans le vieillissement (Sauzéon et al., 2001, Smith, 2006).

## 2.2. Approche comparative avec les Performances de patients avec TC

Les âgés furent comparés dans *l'étude 1* avec des patients avec un TC modéré à sévère dans le but d'examiner l'hypothèse fronto-exécutive, les populations partageant le déficit des fonctions exécutives. Les deux populations sont également connus pour manifester un ralentissement cognitif et, de ce fait notre étude est la première à proposer une approche combinée utilisant à la fois la comparaison directe mais aussi la méthode de médiation statistique, la première développée par le groupe de Stuss (Levine et al., 1996 ; Stuss et al., 1997) et la seconde fréquemment utilisée dans le domaine du vieillissement mais pas à notre connaissance pour examiner l'hypothèse de la réduction de la vitesse de traitement chez les patients avec TC. Le raisonnement sous-tendant cette approche était le suivant : si les âgés et les patients avec TC partagent en commun des performances appauvries sur les mesures de rappel libre, d'apprentissage, de reconnaissance mais aussi de fausses reconnaissances et d'interférence proactive, cette similarité au niveau comportemental pourrait également être sous-tendus par des mécanismes cognitifs similaires en termes de fonctionnement exécutif et/ou de vitesse de traitement.

- Profil mnésique similaire des âgés et des patients avec TC...

Les patients avec un TC sévère à modérée présentaient des performances similaires aux âgés sur le rappel libre, la reconnaissance, mais également la susceptibilité aux fausses

reconnaisances, tandis que l'effet d'interférence était pratiquement chez ces derniers. En revanche, comme les âgés ces patients présentent une préservation de la stratégie de regroupement sémantique lorsque les items sont bloqués par catégorie. Ces données sont cohérentes avec ce qui a été déjà rapporté dans la littérature (DeLuca, Schultheis, Madigan, Christodoulou, & Averill, 2000; Brooks, Weaver, & Scialfa, 2006; pour revue, voir Vakil, 2005). L'effet d'interférence plus important pour les patients n'a pas été trouvé dans *l'étude 1*, à l'instar des âgés, apportant un soutien à l'hypothèse que le paradigme de rappels libres multi-essai ne serait pas sensible à l'évaluation d'un tel effet. Cependant, les études ayant utilisé le CVLT rapportent également ce type de diminution de l'effet d'interférence proactive chez ces patients (e.g., Jacobs & Donders, 2007 ; Numan, Sweet, & Ranganath, 2000 ; Vanderploeg, Crowell, & Curtiss, 2001), pouvant être interprété comme un déficit de consolidation (Vanderploeg et al., 2001). Globalement nos résultats confirment la similarité constatée entre les deux populations dans les études ayant adoptées l'approche de comparaison directe (Kliegel et al., 2004 ; Ozen et al., 2010 ; Vakil & Tweedy, 1994). L'originalité de notre étude réside dans le fait que de telles ressemblances soient rapportées sur du matériel écologique, visuel, et sur des processus bien spécifiques examinés en une seule fois tels que l'apprentissage et différents types de fausses reconnaissances, en plus de la reconnaissance correcte.

Dans l'ensemble, ce pattern similaire entre les âgés et les TC suggère une interprétation identique en termes de mécanismes sous-tendant les performances : le déclin ou le déficit (dans le cas des TC) du contrôle exécutif serait le substrat cognitif des performances mnésiques appauvries. C'est ce que nous avons voulu vérifier en utilisant la médiation statistique.

- ... Mais des mécanismes cognitifs différents

L'effet de l'âge sur le rappel libre lors de l'apprentissage ainsi que sur les fausses reconnaissances était médié par le fonctionnement exécutif. Nous avons également trouvé que la corrélation entre l'âge et les fausses reconnaissances était médié en plus par la mémoire épisodique. Aucune des corrélations de l'âge avec les mesures recueillies sur le HOMES test n'était en revanche médiée par la vitesse de traitement. Ce résultat supporte donc largement l'hypothèse fronto-exécutive du déclin mnésique (Braver & West, 2008 ; Crawford et al., 2000) dans le vieillissement normal plutôt que l'hypothèse de la réduction de la vitesse de traitement (Salthouse, 2000). Des études précédentes avaient également testé ces deux hypothèses au sein d'une même expérience comparant les jeunes et les âgés sur des tâches de

mémoire épisodique, mais des résultats contradictoires ont été rapportés (e.g., Bugajska et al., 2007 ; Lee et al., 2012). Ces études ayant utilisé des procédures différentes ainsi que des tâches différentes, il est difficile de les comparer pour entrevoir ce qui pourrait être à la base de ces résultats conflictuels (e.g., des tâches plus difficiles ou plus faciles, des tâches de mémoire nécessitant peu la mobilisant de la vitesse de traitement, ou au contraire des tests du fonctionnement exécutif fortement influencés par la vitesse de traitement comme le Trail Making test ou encore le Stroop). Remarquons que ces études ont été effectuées encore une fois sur du matériel verbal aussi bien à l'encodage qu'à la récupération. Nos résultats semble conforter, au moins partiellement (puisque la mémoire épisodique contribue aux fausses reconnaissances des âgés) l'hypothèse exécutive en ayant un matériel visuel, et plus écologique de surcroît. Ces résultats apportent également un soutien à l'idée que certains processus mnésiques sont contrôlés (rappel libre et fausses reconnaissances) plus que d'autres (e.g., reconnaissances correctes) (Craik & McDowd, 1987 ; Long et al., 2010).

Suivant cette hypothèse nous nous attendions également à observer des corrélations significatives entre les performances des patients avec TC sur ces mesures issues du HOMES test et le fonctionnement exécutif, ce qui n'a pas été le cas. Or, s'il n'est pas étonnant que la reconnaissance soit plus corrélée avec la mémoire épisodique (Kramer et al., 2005), comme nous l'avons constaté, celle-ci étant moins saturée en processus stratégiques, et reposant beaucoup plus sur les structures du lobe temporal médian telles que le cortex périrhinal et le cortex parahippocampique (Davachi, 2006), la corrélation du rappel libre avec la mémoire épisodique (mais pas avec le fonctionnement exécutif) est plus intrigante chez les patients TC. Malheureusement, le nombre restreint de patients et l'indisponibilité des données de neuroimagerie pour certains d'entre-eux rend impossible toute hypothèse neuroanatomique d'une telle corrélation. Dans tous les cas, cette corrélation renforce l'idée que ces patients présentent une altération de la mémoire épisodique.

Selon le point de vue de Davachi (2006), mais également les études de Ranganath et collègues (Blumenfeld et al., 2006 ; Murray & Ranganath, 2007) que nous avons évoqués dans le *chapitre I*, le traitement item-spécifique reposerait sur un réseau comprenant aussi bien le cortex périrhinal (encodage des objets), le cortex parahippocampique (encodage des objets et de leur position spatiale) et le CPF ventro-latéral (encodage et récupération des objets), tandis que le traitement relationnel reposerait essentiellement sur le cortex entorhinal (associations des objets selon leurs relations spatiales ou avec l'information contextuelle de manière plus générale), l'hippocampe (intégration de cette association sous forme de souvenir épisodique cohérent), et le CPF dorso-latéral (encodage et récupération des relations



sémantiques entre les objets ou les items). La corrélation de la mesure de rappel avec le fonctionnement exécutif pourrait selon cette dichotomie être interprétée comme un déficit du traitement item-spécifique en accord avec les études montrant une réduction de l'activation du LTM lors d'une tâche de reconnaissance d'objet ou de scènes naturelles (e.g., Gutchess et al., 2005), mais aussi de celle du CPF ventro-latéral lors du rappel libre (St-Jacques, Rubin, & Cabeza, 2012). En revanche, ces mêmes études montrent une plus forte activation du CPF dorsolatéral chez les âgés (Gutchess et al., 2005), pouvant être interprétée comme un appui compensatoire sur le traitement relationnel préservé. La similarité des performances mnésiques entre les âgés et les TC suggèrent que le déficit item-spécifique couplé à un traitement relationnel préservé serait également présent chez ces patients. La corrélation du rappel mais aussi de la reconnaissance correcte uniquement avec la mémoire épisodique suggèrerait que ce déficit item-spécifique concernerait l'atteinte plus massive des structures telles que le cortex périrhinal et le cortex parahippocampique plutôt que le cortex préfrontal. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse dans une étude utilisant les techniques de neuro-imageries fonctionnelles.

Notre *étude 1* suggèrent donc que malgré la ressemblance étonnante des performances de mémoire située entre les âgés et les patients avec TC, des médiateurs cognitifs différents pourraient en être la cause. Cette conclusion souligne le caractère orchestré de la mémoire située où les relations entre les médiateurs cognitifs sont critiques. D'ailleurs, il se peut également que des fonctions autres qu'exécutives ou mnésiques puissent également contribuer aux performances, comme les fonctions visuo-spatiales ou l'attention divisée. En effet, les troubles visuo-spatiaux tout comme les troubles attentionnels sont fréquents chez les patients avec un TC, impactant par exemple la capacité de naviguer dans de grands espaces, l'orientation topographique, ou bien résultant en négligence spatiale unilatérale (Geldmacher & Hills, 1997 ; Livingstone & Skelton, 2007 ; Sorita et al, 2012). Nos résultats, bien qu'intéressants, nous limitent donc dans notre interprétation. Un argument plus solide en faveur de l'une ou de l'autre des hypothèses proviendrait certainement d'un plus grand nombre de sujets dans l'étude, du recours de données neuroanatomiques.

### 2.3. Profil mnésique distinct des âgés et des patients avec une MA

Dans notre étude 2, des âgés furent comparés aux patients présentant une maladie d'Alzheimer au stade léger à modéré sur les mesures du HOMES comme l'apprentissage, le

rappel vs. reconnaissance, le regroupement sémantique, l'interférence proactive et les fausses reconnaissances.

- Les déficits mnésiques observés chez les patients avec MA

Nous avons constaté un déficit des performances chez ces patients sur chacune de ces mesures à l'exception de l'interférence proactive, quasi inexistante due à l'effet plancher. Toutefois, en utilisant d'autres paradigmes il a aussi été montré que ces patients ne montrent ni une construction de l'interférence ni son relâchement (e.g., la construction et le relâchement de l'interférence proactive, Belleville et al., 1992). Cette absence d'effet d'interférence ajouté à un score de regroupement sémantique presque inexistant malgré l'aide environnementale apportée sous forme de « blocking » est en accord avec l'idée d'un déficit de la mémoire sémantique en plus de celui de la mémoire épisodique (Belleville et al., 1992) ou encore d'un déficit des traitements relationnels de nature sémantique en plus de celui des traitements item-spécifiques (Pierce et al., 2005). Notre étude est aussi en accord avec le point de vue selon lequel ces déficits de traitement relationnel sémantique seraient précoces, puisque nos patients sont recrutés à un stade léger à modéré (Vogel, Gade, Stockholm, & Waldemar, 2005). L'incapacité de ces patients de prendre avantage de l'aide environnementale apportée par le blocking dans notre étude reflète également le même type de phénomène rapporté lorsqu'un rappel indicé est présenté (Dierckx et al., 2007). D'ailleurs, cette altération aussi bien des traitements relationnels que des traitements item-spécifiques aboutirait à un pattern bien spécifique quant à la susceptibilité aux fausses reconnaissances : ces patients ne présentent pas de susceptibilité aux fausses reconnaissances lorsque l'item à reconnaître n'est présenté qu'une seule fois soit lors de la phase d'encodage soit lors de la récupération, mais celle-ci augmente avec une présentation répétée des items (Abe et al., 2011 ; Budson et al., 2000). De récentes évidences pointent également vers une altération à la fois de la familiarité que de la recollection dans la maladie d'Alzheimer (Ally, Gold, & Budson, 2009). Classiquement, de tels résultats sont rapportés sur du matériel verbal. Notre *étude 2* témoigne, à travers l'utilisation d'un matériel plus écologique, de la validité de telles mesures pour rendre compte des difficultés et du handicap vécu dans les situations de la vie quotidienne et renforce l'idée que les troubles mnésiques des patients avec une MA concernent toutes les étapes du traitement de l'information (à savoir l'encodage, la consolidation et la récupération) (Bäckman, Small, & Fratiglioni, 2001 ; Squire, 1992).

- Comparaison des effets des médiateurs cognitifs chez les âgés et les patients avec MA

L'examen des mécanismes cognitifs à la base de ces performances chez les âgés et les patients nous a encore une fois permis de constater une médiation des performances de rappel libre et de reconnaissances correctes (rassemblés sous la mesure composite de *true memory* ou « mémoire vraie ») par le fonctionnement exécutif tout comme celle de la susceptibilité aux fausses reconnaissances (ou *false memory*). Répliquant ainsi le pattern médiationnel observé dans l'étude 1 pour les âgés. Cette stabilité des résultats médiationnels à travers les deux études chez les âgés apporte encore une fois un soutien favorable à l'hypothèse fronto-exécutive du déclin mnésique lié à l'âge. Nous avons également trouvé que ces fausses reconnaissances étaient corrélés aux épreuves de mémoire épisodique, contrairement à Salthouse & Siedlecki (2007), qui ne trouvèrent qu'une corrélation unique des fausses reconnaissances avec la mémoire épisodique et non pas avec les tests des fonctions exécutives. Cette double corrélation est interprétée dans le vieillissement normal comme étant un indice quant à de potentiels mécanismes sous-tendant les fausses reconnaissances : il est probable que cette corrélation reflète un déficit d'un traitement item-spécifique, impliquant des processus de recollection, qui eux-mêmes ont été corrélés au fonctionnement exécutif (e.g., Bougaiska et al., 2007). Il se pourrait aussi que cette corrélation reflète les processus de monitoring post-récupération démontrés comme également déficitaires dans le vieillissement (Gallo, 2010) eux-mêmes associés au déclin du fonctionnement exécutif (Mather, Henkel, & Johnson, 1997 ; Plancher et al., 2009).

Concernant les patients avec une MA léger à modéré, peu d'effets de médiation ont été obtenus, excepté pour leur susceptibilité accrue aux fausses reconnaissances. Les troubles dysexécutifs peuvent se révéler assez précocement dans la maladie (Binetti et al., 1996 ; Baudic, Barba, Thibaudet, Smagghe, Remy, & Traykov, 2006) et pourraient très bien contribuer aux déficits de la mémoire épisodique, cependant notre *étude 2* montre au contraire que les fausses reconnaissances ne sont corrélés qu'aux déficits de la mémoire épisodique. De manière spéculative, ces mécanismes pourraient être plus en rapport avec la dégénérescence des tissus corticaux environnant l'hippocampe (e.g., cortex périrhinal et entorhinal, correspondant aux stades I et II de Braak & Braak, 1991). Nous ne connaissons cependant aucune étude qui ait corrélé les fausses reconnaissances chez les patients avec une MA à différents stades. Toutefois les fausses reconnaissances ont pu être corrélées aux plaques séniles plutôt qu'à la quantité de protéine Tau recueillie dans le liquide cérébro-spinal (Hildebrandt, Haldewanger, & Eling, 2009). Nous n'avons en revanche trouvé aucune corrélation significative entre la mesure composite de « vraie mémoire » et les mesures neuropsychologiques dans nos patients avec une MA.

#### 2.4. Plaintes mnésiques subjectives chez les âgés et les patients

Dans notre *étude 1*, nous avons également constaté une plainte plus forte chez les âgés comparés aux jeunes mesurée par le QAM, mais une plainte mnésique encore plus forte chez les patients TC en comparaison à celle des âgés. Les plaintes mnésiques sont communes chez les âgés, et nos résultats étayaient cette conclusion (e.g., Hertzog & Hultsch 2002). Nous avons également trouvé une corrélation entre la mesure d'apprentissage du HOMES et les performances des âgés sur le QAM dans *l'étude 1*. Lorsque le score de reconnaissance correcte fut associé à celui des scores de rappels libres dans la mesure composite de « mémoire vraie » dans *l'étude 2*, nous avons également retrouvé cette corrélation avec le QAM. Il est donc probable que cette corrélation se justifie par le fait que les questions du QAM sont plutôt tournées vers des tâches de rappel, et de manière générale, des tâches qui demandent un processus de recollection intact tout comme des capacités exécutives et métacognitives préservées (Hertzog & Hultsch 2002). Une telle corrélation n'est pas toujours observée comme nous l'avons déjà mentionné dans la discussion de nos articles, imputable notamment à un manque de validité des tests traditionnels de mémoire (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). Le fait d'obtenir cette corrélation lorsque des tâches plus naturelles sont utilisées que ce soit ou non par la RV (e.g., Schmitter-Edgecombe & Selyee, 2012 ; Plancher et al., 2010) appuie cette dernière hypothèse. Ainsi, une corrélation entre les mesures quantitatives de la mémoire avec la plainte subjective est « débusquée » lorsque les premières se rapprochent de comportements provenant d'une tâche simulant une situation quotidienne. En outre, nos résultats de *l'étude 1* vont dans le sens de l'hypothèse exécutive : nous avons effectivement montré que le déclin exécutif des âgés influence la relation entre les mesures du HOMES, comme l'apprentissage, et la plainte subjective. Aussi, dans *l'étude 2*, la plainte mnésique diminuait la relation entre l'âge et les performances de mémoire du HOMES test (le score composite de « mémoire correcte ») sans l'annuler. Rappelons que d'autres hypothèses que le déclin exécutif ont été également proposées pour rendre compte des modifications avec l'âge des relations entre performances objectives et performances subjectives de la mémoire, et notamment l'implication médiatrice des facteurs affectifs comme la dépression (Bolla et al., 1991) ou encore des traits de personnalité (Reid & McLullich, 2006).

Concernant les patients TC, tout comme les âgés, ils présentent une plainte mnésique mais celle-ci est d'une plus grande amplitude mais non corrélée aux performances objectives

délivrées par le HOMES test. Là aussi, les études dédiées à cette question chez les TC indiquent une origine pluri-factorielle en termes de facteurs psycho-affectifs et cognitifs (exécutifs et métacognitifs) (Gass & Apple, 1997 ; Schiehser et al., 2011). A cela, nous pourrions ajouter l'interprétation de l'école Hertzog qui met en lumière les effets des stéréotypes sociétaux sur les attentes de performances des personnes et, qui, en retour, induit des sous- ou sur-estimations des difficultés rencontrées. A notre connaissance, aucune étude chez les TC n'a adressé cette possible interprétation, qui pourtant à travers notre approche cross-populations est soulevée puisque, à déclin mnésique identique, les jeunes patients TC ont une plainte supérieure à celle des âgés.

Chez les patients avec une MA, aucune corrélation entre la plainte mnésiques et les performances au HOMES test n'est rapportée. Cette observation est bien documentée dans la littérature neuropsychologique de cette maladie (e.g., Carr, Gray, Baty, & Morris, 2000), et l'hypothèse la plus souvent retenue est une altération massive métacognitive en lien avec l'anosognosie souvent rapportée dans cette pathologie (Galeone et al., 2011).

### **3. Conclusion**

Au total, nos deux études montrent une réplification des effets de l'âge sur le rappel libre, la reconnaissance et les fausses reconnaissances déjà obtenus dans des études précédentes de laboratoires ou celles utilisant les tests traditionnels et une préservation du regroupement sémantique, mais une diminution de l'effet de l'interférence. Pris dans l'ensemble ce profil de mémoire située des âgés semble suggérer deux interprétations qui ne sont pas nécessairement en conflit : d'une part un déficit du traitement item-spécifique couplé à la conservation du traitement relationnel (Smith, 2006), et d'autre part, un déclin du fonctionnement exécutif (Braver & West, 2008). Ces hypothèses n'excluent pas non plus d'autres apports théoriques similaires stipulant un déclin du processus de recollection, mais une préservation du processus de familiarité (Anderson et al., 2008), le premier faisant non seulement intervenir des traitements item-spécifiques mais également le fonctionnement exécutif basé sur l'activité du cortex préfrontal tandis que le second faisant essentiellement intervenir un traitement relationnel essentiellement supporté par des structures telles que le cortex parahippocampique (Murray & Richmond, 2001).

Notre procédure d'évaluation de la mémoire quotidienne via le HOMES test basé sur la RV met en évidence un pattern de performances mnésiques similaires entre les âgés et les patients

avec TC déjà rapporté dans la littérature, et elle permet aussi de distinguer le profil mnésique de âgés de celui des patients avec une MA. En cela, nos résultats suggèrent aussi une validité de construit de l'implémentation du paradigme de rappel libres multi-essais au sein d'un dispositif RV visant l'évaluation de la mémoire quotidienne ou de la mémoire en situation réaliste. Cette validité de construit, ou plus spécifiquement une validité convergente est également renforcée par les corrélations que nous avons obtenues entre nos mesures d'apprentissage et de reconnaissances du HOMES avec les tests traditionnels de mémoire épisodique (i.e., CVLT).

#### **4. Perspectives**

Plusieurs perspectives de travail se dessinent à l'issue de ces travaux : 1) exploiter les apports d'une démarche cross-populations ; 2) optimiser les technologies de la RV pour l'étude de la mémoire quotidienne.

- *D'autres apports de la démarche cross-populations*

Dans nos études, nous avons surtout comparés les âgés aux patients avec TC et avec une MA. Cependant, comme le CVLT, le HOMES test pourrait être intéressant sur le plan clinique afin de contribuer au diagnostic différentiel de certaines pathologies en mettant en évidence des profils mnésiques distincts. Le travail pourrait alors se poursuivre par exemple avec des patients atteints d'une trisomie 21, une telle poursuite est actuellement en cours au laboratoire.

La Trisomie 21 (T21) est une pathologie chromosomique congénitale provoquée par la présence d'un troisième chromosome sur la 21ème paire (Lejeune et al. 1959). Il s'agit de la forme génétique de déficience intellectuelle la plus fréquente avec une incidence de 1 cas pour 700-800 naissances (Dolk et al. 1990). Les personnes porteuses de ce syndrome présentent un large spectre de symptômes cliniques dont des troubles neurologiques parmi lesquels, une hypotonie, un retard mental allant de léger à sévère (le QI des adultes étant généralement compris entre 25 et 55 avec une limite supérieure d'âge mental de 7 – 8 ans), et la détérioration progressive des fonctions cognitives. Les fonctions cognitives les plus affectées et qui concourant largement à perturber l'autonomie des personnes qui sont porteuses de T21 concernent la sphère langagière et mnésique (Lott & Dierssen, 2010).

Les perturbations neurocognitives s'expliquent par la présence d'une microcéphalie et des atrophies spécifiques des lobes frontaux, temporaux et du cervelet (Rabin et al. 2005). De manière plus spécifique, la dégénérescence du système cholinergique associée à une concentration augmentée de plaques amyloïde est largement identifiée dans les modèles

animaux de la T21, et chez l'humain porteur de T21, l'incidence de la MA est augmentée et précoce (Lott & Dierssen 2010). Carlesimo et al. (1997) décrivent des déficits marqués en mémoire épisodique qui affectent aussi bien l'encodage que la restitution. Ces déficits semblent en grande partie dépendants de l'atteinte hippocampique mais les altérations des autres régions cérébrales peuvent également participer au profil mnésique déficitaire observé.

L'étude des processus mnésiques associés à la T21 a pendant longtemps souffert d'un désintérêt marqué, probablement du à la faible espérance de vie qu'avaient ces personnes jusque dans les années soixante. On dispose cependant de quelques études convergeant vers, un rappel, un apprentissage et des processus de catégorisation déficitaires, une absence anormale d'effet d'interférence et un bénéfice de la reconnaissance sans normalisation de la performance (Nichols et al. 2004). Ce profil n'est pas sans rappeler celui des personnes atteintes de DTA<sup>1</sup> (Brugge et al. 1994) qui tous deux sont interprétés comme le reflet d'un dysfonctionnement marqué des structures temporo-hippocampiques et frontales (dans une moindre mesure).

Par ailleurs un effet de modalité est souvent rapporté et souligne une atteinte particulière des traitements de nature verbale par rapport aux traitements visuels notamment la mémoire de travail en modalité verbale est très affectée alors qu'elle est subnormale en modalité visuo-spatiale, lorsque les personnes porteuses de T21 sont comparées à des sujets contrôles (eg. Comblain, 1996) ou à d'autres déficients intellectuels (Edgin et al. 2010). Edgin et al. (2010) rapportent que si le rappel verbal est le meilleur prédicteur du QI de personnes porteuses de T21, c'est leur performance de mémoire visuelle qui prédit le mieux l'adaptabilité<sup>2</sup> de leurs comportements dans la vie quotidienne.

- *Vers une investigation plus étendue de la mémoire quotidienne par la RV*

Nous avons mentionné dans le *chapitre I* que les bases théoriques de la mémoire quotidienne restent encore à définir. Une modèle récent à cet égard à toutefois été proposé par Zacks et ses collègues (Zacks et al., 2006) appelé la théorie de la segmentation des événements, stipulant que mettre du signifiant dans nos événements est essentiel et permet de mieux encoder et consolider les souvenirs par la suite. Mais nous y arrivons grâce à une analyse visuelle séquentielle d'un événement. Cette fragmentation d'un événement en plusieurs petites unités

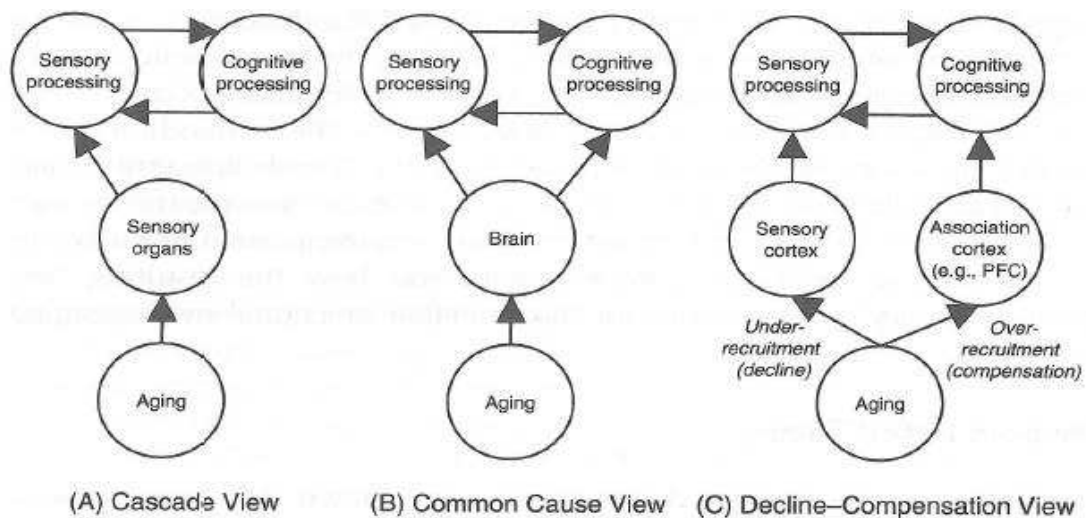
---

<sup>1</sup> Il est connu que les personnes avec T21 ont un risque plus élevé de développer précocement les signes cliniques de la MA. Les taux de prévalence suivants ont été rapportés : quelques pourcents entre 30 et 39 ans, de 10 à 25% entre 40-49 ans, de 20% à 50% entre 50-59 ans, et enfin de 30% à 75% chez les plus de 60 ans (eg. Ball et al. 2008).

<sup>2</sup> L'adaptabilité comportementale au quotidien fait référence à la qualité de la réponse aux demandes et exigences de l'environnement lors de situation quotidienne (Su et al. 2008) ;

serait au cœur du processus d'encodage et chacune des parties seraient en fin d'analyse liée au tout grâce au binding. Ce type de théorie permet de faire appel à des moyens technologiques supplémentaires pour la tester, et la RV est tout à fait approprié pour analyser l'encodage lors d'une exploration visuelle d'un environnement écologique. Dans les études de Zacks et collègues, les participants ne font qu'étudier les événements présentés sous formes de films ou de séquences d'images en 2D. Dans le cas de la RV, nous pouvons ajouter la perspective 3D mais aussi la dimension visuelle « exploratoire » et analyser la manière dont le séquençage d'un événement à lieu lorsque l'activité oculaire du participant est engagée. Une telle analyse nécessite de coupler la RV avec des analyses comportementales en termes de saccades et fixations oculaires (par Eyetracker, par exemple) et permettrait d'aboutir de sonder le rôle de l'encodage visuel dans la constitution des souvenirs épisodiques en immersion dans une situation de vie quotidienne.

Une telle perspective pourrait être particulièrement informative dans le domaine du vieillissement cognitif notamment à la lumière des travaux s'inscrivant dans 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. 26).



**Figure 26.** 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 (eg., sur-activation du CPF).



Appliquée à la mémoire quotidienne, via le HOMES test, cette perspective pourrait nous permettre d'examiner le pattern de fixations et de saccades chez les âgés et de le mettre en lumière avec les performances mnésiques mesurée, et par là même renseigner les relations perception visuelle –mémoire quotidienne dans le vieillissement. Aussi, une méthode corrélationnelle avec des tests classique de mémoire et des fonctions exécutives pourrait permettre de savoir si l'encodage visuel implique des processus cognitifs stratégiques et dans quelle mesure cela affecte par la suite les scores de segmentation de l'événement qui pourraient prélevés à partir du HOMES test.

## **II. Bénéfice de la navigation active sur la mémoire quotidienne dans le vieillissement**

### **1. Synthèse des résultats des études 3 et 4**

Les *études 3 et 4* se sont intéressées aux effets de la navigation active sur les processus de mémoire quotidienne que nous avons évalués dans les deux premières études. Ainsi, dans *l'étude 3* effectuée uniquement auprès de participants jeunes, nous avons pu montrer que, comparée à la navigation passive dans laquelle les sujets suivaient une visite de l'appartement pré-guidée par le programme informatique, le contrôle moteur volontaire de la navigation (que nous avons nommé navigation active) permettait d'améliorer les performances de rappel libre lors de l'apprentissage, mais aussi de reconnaissance correctes. De plus, le fait de naviguer activement permettait de diminuer la susceptibilité aux fausses reconnaissances chez les jeunes. Ce même pattern a été reproduit chez les jeunes dans *l'étude 4* (à l'exception du rappel libre), témoignant d'un effet miroir (Guntre, Bodner, & Azad, 2007).

Dans l'étude 4 concernant les effets du vieillissement, si les âgés montraient de meilleures performance de reconnaissance, seul indice à pouvoir bénéficier d'une navigation active, cette dernière s'est avérée plutôt délétère sur les fausses reconnaissances en les augmentant de manière dramatique. Les effets de médiation cognitive (par le fonctionnement exécutif ou mnésique) ont alors révélé une influence modérée mais significative du fonctionnement exécutif et de la mémoire épisodique pour les reconnaissances correctes après navigation active, contrastant avec l'influence unique du fonctionnement exécutif sur la majoration des fausses reconnaissances après une navigation active.

Par ailleurs, comme attendus, la navigation active différencie pas les jeunes et les âgés sur les indicateurs d'interférence proactive et de regroupement sémantique.

Nous discutons de ces résultats dans la section suivante.

## 2. L'effet de la navigation active sur la mémoire quotidienne

Il y a environ 14 ans de cela, Brooks et al. (1999) firent le parallèle entre la navigation active et l'effet SPT que nous avons déjà décrit dans nos chapitres théoriques. Par ailleurs, il est encore très difficile d'expliquer les résultats contradictoires dans la littérature concernant l'effet de la navigation active. Nous avons alors émis une hypothèse doublement avantageuse car pouvant potentiellement vérifier la spéculation de Brooks et collègues ainsi que proposer une explication du manque de consensus quant au bénéfice de la navigation active : Si la navigation active est identique, ou du moins similaire, à l'effet SPT, toutes les deux faisant intervenir la motricité volontaire, alors les effets bénéfiques de ce type de navigation devrait également dépendre des processus qui ont été considérés comme sous-tendant l'effet SPT tels que les traitements item-spécifiques et relationnels (Engelkamp, 2001). Plus précisément, la navigation active devrait augmenter les performances de rappel libre ainsi que celle de reconnaissances correctes, les deux dépendant du traitement item-spécifique (le rappel libre dépendant également du traitement relationnel) (Burns, 2006, voire le Tableau 3 à la fin du *chapitre 1*). Cependant, elle ne devrait pas modifier les performances sur les mesures dépendantes du traitement relationnel comme le regroupement sémantique (Von Essen, 2005 ; Peterson & Mulligan, 2010).

### 2.1. La navigation active comme effet SPT : tâches de rappel et de reconnaissance

- Chez le sujet jeune

Les *études 1 & 2* ont en partie apporté un soutien solide à cette hypothèse puisque nous avons effectivement pu obtenir de meilleures performances de rappel libre (*étude 1*) mais également de reconnaissances correctes (*étude 1 & 2*) après une navigation active, mais celle-ci n'affectait ni la susceptibilité à l'interférence proactive ni la capacité de regrouper les items selon leur appartenance à une catégorie sémantique. Par conséquent, ces résultats s'alignent avec ceux obtenus sur l'effet SPT (Engelkamp, Zimmer, Mohr, & Sellen, 1994 ; Engelkamp & Zimmer, 2002), mais également avec ceux de James et al. (2001, 2002) et, de Hahm et al. (2007) qui montrent de meilleures performances de reconnaissances des objets après une navigation active en utilisant la RV.

En accord avec Engelkamp (2001), la navigation active apporterait un renforcement du traitement item-spécifique en rendant les objets à encoder plus distinctifs, c'est-à-dire plus saillants. Ceci se ferait plus concrètement lorsque la motricité volontaire permet de se diriger

vers les objets particuliers à encoder et sur lesquelles l'attention est engagée durant la phase d'étude.

Comme mentionné dans le *chapitre II* faisant état des travaux utilisant la RV, les mécanismes neurocognitifs aboutissant au bénéfice de la navigation active sont de nature complexe. D'abord, concernant la mémoire spatiale, il semblerait que la navigation active soit le plus souvent bénéfique (Brooks et al., 1999 ; Plancher, Barra, Oriols & Piolino, 2013) même si cette conclusion reste encore à controverse (pour voir la revue de question de Chrastil & Warren, 2012). A la différence, pour la mémoire d'objet, un effet bénéfique de la navigation est observé uniquement lorsqu'il s'agit d'items familiers (Stülpnagel & Steffens, 2012). Cette familiarité présuppose que ces objets soient identifiés au préalable, et qu'ils soient donc déjà encodés une première fois. Cette familiarité, permettrait alors de libérer suffisamment de ressources attentionnelles pour bénéficier du caractère distinctif de l'activité sensori-motrice (Voss et al., 2011 ; Baumann et al., 2010). Cette interprétation rejoint celle fournie par la distinction « item-spécifique vs. Relationnel » puisque rappelons –le, un effet SPT sur les traitements item-spécifiques est attendu uniquement dans un contexte de traitements sémantique relationnels ( « *the distinctiveness of an event is the processing of differences in the context of similarity* », Hunt, 2006, p.12).

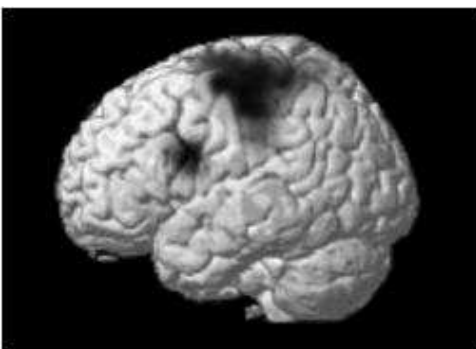
Dans notre étude, les participants ont eu le temps de se familiariser avec l'environnement puisqu'ils y ont été exposés de manière répétitive au cours des essais d'apprentissage. De plus, l'appartement virtuel est lui-même construit pour être hautement familier (objets d'une maison courante dont la structure est familière). Ces facteurs de familiarité et de familiarisation avec l'environnement conduiraient à des traitements relationnels suffisants, pour qu'une navigation active produise un effet de distinctivité rendant les traitements-items-spécifiques plus efficaces.

La corrélation observée entre les reconnaissances correctes et le fonctionnement exécutif ou la mémoire épisodique est consistant avec les études montrant l'activation du cortex parahippocampique et/ou du cortex périrhinal (Davachi, 2006) et de manière plus générale de l'hippocampe (Voss et al., 2011), mais dans la mesure où la reconnaissance correcte ne concernerait que le traitement item-spécifique, il n'est pas non plus étonnant de trouver une corrélation avec le fonctionnement exécutif, consistant avec les études montrant l'activation du cortex préfrontal (notamment ventro-latéral, Blumenfeld et al., 2006). Cette double corrélation exécutive et épisodique avec la reconnaissance correcte reflèterait donc la mobilisation du processus de recollection mais aussi des efforts cognitifs nécessaires pour mieux étudier les objets lors d'une navigation active indépendamment de l'âge, en accord

avec l'étude de Green & Soto (2012) qui, rappelons-le, montrent qu'un « encodage actif » par la mobilisation de la mémoire de travail conduit à de meilleures performances de reconnaissance des objets familiers.

- Chez le sujet âgé

Le parallèle entre effet SPT et navigation active trouve support également pour nos résultats concernant les effets du vieillissement sur les performances de reconnaissance, tâche considérée comme mobilisant uniquement les traitement-item-spécifiques. Les âgés, dans l'étude 2, purent augmenter leurs performances de reconnaissances correctes après une navigation active. Ces résultats sont également en accord avec les études rapportant un bénéfice préservé avec l'âge de l'effet SPT et notamment en tâches de reconnaissance (Bäckman, 1985 ; Dijkstra & Kaschak, 2006 ; Feyereisen, 2009 ; pour des résultats différents voir, Brooks & Gardiner, 1994 ; Guttentag & Hunt, 1988). Pour rappel, Nyberg et al. (2002) ont analysé les performances de 1000 participants âgés de 35 à 80 ans, et ont montré que seuls 5% des participants (une majorité de personnes très âgées) ne présentaient pas l'effet SPT. Cet effet SPT intact avec le vieillissement a été confirmé dans d'autres études. Aussi, Nyberg et ses collaborateurs ont identifié comme causes possibles de la perte de l'effet bénéfique du SPT un dysfonctionnement du traitement moteur (via des indicateurs biologiques et neuropsychologiques) corroborant les résultats des études en neuroimagerie qui montrent un lien entre l'effet SPT et les régions motrices du cerveau (Fig. 27).



**Figure 27.** (adapté de Nyberg et al., 2001, p 836):

*“Brain activity associated with cued recall after enacted compared to verbal encoding. Regions where increased activity was observed included contra-lateral (left) motor/somatosensory cortex, premotor cortex, and inferior and superior parietal cortex. Adapted from “Reactivation of motor brain areas during explicit memory for actions” par Nyberg et al. (2001)*

Comme l'indique nos résultats corrélacionnels, il se pourrait également qu'une meilleure performance après une navigation active chez les âgés soit obtenue au prix d'un effort cognitif considérable, expliquant sans doute la corrélation avec le fonctionnement exécutif en plus de celui de la mémoire épisodique.

Par contre, ce bénéfice de la navigation active n'est pas retrouvé en rappel libre chez les âgés et semble variable chez le sujet jeune. Cette variation chez le sujet jeune pourrait

provenir de la méthode « between-subjects » utilisée pour l'effet de navigation puisque dans la logique du parallèle avec l'effet SPT, ce dernier a été montré plus robuste en « within subjects » (e.g., Engelkamp & Dehn, 2000).

Quoi qu'il en soit, nos résultats chez les âgés répliquent ceux de l'étude de Nilsson & Craik (1990) qui trouvèrent que le rappel libre n'était amélioré ni chez les jeunes ni chez les âgés dans la condition SPT comparé à la condition verbale, en revanche, les effets de l'âge sur la reconnaissance avaient diminués dans la condition SPT comparés à la condition verbale.

## *2.2. La navigation active et fausses reconnaissances*

Nous avons rapporté une interaction entre l'âge et le type de navigation sur les fausses reconnaissances, décrivant un effet bénéfique de la navigation active chez les jeunes en termes de réduction des fausses reconnaissances, mais au contraire une augmentation des fausses reconnaissances. Un résultat récente effectuée au sein de notre équipe (Taillade et al., 2013) a également rapporté plus d'erreurs lors d'une tâche de wayfinding spatiale chez les âgés comparés aux jeunes dans la condition « navigation active ». Ce pattern inversé de performances comportementales chez les âgés, bien que surprenant au premier abord, semble en fait tout à fait en accord avec l'interprétation en termes de distinction entre « traitement item-spécifique et relationnel ».

Plus particulièrement, ce type de résultats fait écho aux études qui ont montré que l'apport de distinctivité (ou un enrichissement de l'encodage en information item-spécifique) lors de l'encodage augmente la susceptibilité des âgés aux fausses reconnaissances, et de manière plus générale aux fausses mémoires (Butler, McDaniel, McCabe, & Dornburg, 2010 ; Smith, Lozito, & Bayen, 2005). Pour ces auteurs, le déficit de traitement item-spécifique s'accompagne également d'un déficit d'attribution correcte de la source ou un déficit exécutif de monitoring de la source (situé en post-récupération). Par exemple, Butler et al rapportent que la sensibilité des âgés aux fausses reconnaissances après un encodage orienté sur un traitement item-spécifique était corrélé au fonctionnement exécutif des âgés. Ce résultat est similaire au notre. Dans la mesure où notre tâche de reconnaissance est constitué de cibles et de deux types de leurres (source et sémantique), il pourrait être avancé que la navigation active, par l'encodage sensori-moteur qu'elle offre, constitue une aide pour les jeunes en post-récupération pour contrôler la source des items alors que chez les âgés, l'ajout d'information sensorimotrice à l'encodage pourrait rendre le processus de monitoring de la source plus complexe d'autant que la nature des leurres diffèrent. En effet, le caractère distinctif de

l'encodage sensorimoteur est pertinent pour discriminer les cibles des leurres sémantiques mais ne l'est pas pour les leurres sources qui ont été également encodés de manière sensorimotrice. En d'autres termes, la présence des deux types de leurres oblige une flexibilité dans les stratégies de rejet où parfois les détails sensorimoteurs (liés à condition de navigation active) peuvent être efficacement utilisés et d'autre fois pas. De là, la corrélation que nous observons avec le fonctionnement exécutif paraît tomber sous le sens. Cette interprétation est en partie soutenue par l'effet tendanciel « Age X Navigation X Type de Leurre » ( $p=.08$ ). Néanmoins, une étude pourrait tester cette interprétation en faisant juste varier le statut des leurres sources (avec encodage sensori-moteur ou sans). Si en condition « leurres sources » sans encodage sensorimoteur permet aux âgés de réduire leur sensibilité aux fausses reconnaissances alors serait démontré le rôle de la flexibilité des stratégies de monitoring comme origine de l'augmentation des fausses reconnaissances dans l'étude que nous avons rapporté.

### 2.3 Conclusion

Pris ensemble, nos deux études montrent une relative constance dans le pattern des performances lorsqu'un encodage est effectué pendant une navigation active chez les jeunes avec une augmentation des performances de reconnaissance correctes, et une diminution des fausses reconnaissances. La navigation active a également augmenté la reconnaissance des objets chez les âgés, mais au contraire elle a augmenté les fausses reconnaissances chez ces derniers. Ces résultats ont été interprétés en termes de distinction entre traitements item-spécifique et traitements relationnels. La navigation active, tout comme l'effet SPT, augmente les performances sur des tâches fortement influencées par le traitement item-spécifique (e.g., la reconnaissance correcte), alors que cet effet serait absent sur les tâches fortement influencées par le traitement relationnel (e.g., le regroupement sémantique). Cette interprétation est tangible aussi bien pour les jeunes que pour les âgés.

Pour expliquer l'effet délétère de la navigation active sur la sensibilité des âgés aux fausses reconnaissances, nous avons évoqué une possible difficulté de flexibilité chez les âgés à alterner les stratégies de monitoring de la source en présence de plus types de leurres. Cette supposition est supportée par l'observation d'une médiation du déclin exécutif sur la relation entre l'âge et la propension aux fausses reconnaissances.

Au total, quant au fait de savoir *comment l'activité motrice induite par une navigation active interagit-elle avec la mémoire épisodique* (voire chapitre IV), nous avons montré que la

navigation active augmente sur un matériel familier, tel qu'un appartement, les performances surtout sur les tâches de reconnaissances aussi bien chez les jeunes que chez les âgés, en revanche elle n'a pas d'effet sur les stratégies d'encodage tels que le regroupement sémantique. Le bénéfice de la navigation est parfois retrouvé sur le rappel libre et parfois non.

*Quels pourraient être les mécanismes neuropsychologiques sous-jacent à la navigation active ?* Globalement nos résultats ont permis de comprendre que la navigation réplique pour une large part l'effet SPT tel qu'attendu dans le cadre de la distinction « item-spécifique vs. relationnel ». Nous avons également suggéré que cette explication en termes de traitement item-spécifique vs. relationnel pourrait potentiellement expliquer les résultats souvent conflictuels dans la littérature sur la navigation active.

*Enfin, permet-elle de lever les effets de l'âge sur la mémoire quotidienne ?* Nous avons pu montrer que le seul bénéfice de la navigation active portait sur la reconnaissance et dans aucune autre suite à une navigation active, et même cela augmente leur fausses reconnaissances, ce qui en révèle les limites en termes d'intervention remédiate. Cette conclusion est par ailleurs en faveur de l'hypothèse d'un déficit item-spécifique mais aussi du déclin fronto-exécutif de la mémoire chez les âgés.

#### 2.4. Perspectives

Notre étude a certes comparé une condition passive de navigation à une condition active de navigation chez les âgés et les jeunes. Cependant, afin d'aller plus loin dans l'hypothèse que l'effet de la navigation active est similaire à l'effet SPT, l'environnement et le protocole nécessiterait quelques modifications. Nous comptons ainsi poursuivre nos études pour explorer de manière plus étendue le problème de la navigation active à plusieurs niveaux :

D'abord, sur *le plan méthodologique*, dans nos études sur l'effet de la navigation active, nous avons donné un contrôle total à nos participants aussi bien du point de vue moteur que du point de vue cognitif. Dans la mesure où les fausses reconnaissances des âgés ont été fortement influencées par le fonctionnement exécutif, il serait également intéressant de reproduire avec le HOMES le paradigme de séparation des contrôles (Bakdash, Profitt, & Linkenauer, 2008 ; Plancher et al., 2013 ; von Stülpnagel & Steffens, 2012) afin de déterminer si le fonctionnement exécutif est plus relié au contrôle moteur ou au contrôle cognitif.

Puis, sur *le plan comportemental*, nous pouvons par exemple envisager une reconnaissance non pas verbale comme dans notre protocole actuel, mais une reconnaissance dans laquelle des images prises de l'environnement virtuel sont présentées parmi des images

virtuelles qui n'ont jamais été étudiées. Ce changement pourrait nous permettre de savoir si l'effet de la navigation active est toujours présent, et s'il est plus important comparé à une reconnaissance verbale. Ce changement de modalité nous permettrait également d'examiner si les âgés font autant de fausses reconnaissances lorsqu'une plus grande distinctivité est apportée à la récupération, en gardant la même modalité (visuelle) à l'encodage et à la récupération. Ce type de protocole nous permettrait de toucher les processus de heuristique de distinctivité de plus près (Israel & Schacter, 1997 ; Gallo, 2010).

En outre, nous pouvons plus spécifiquement demander à un groupe d'aller directement « toucher/manipuler » les objets virtuels de l'appartement et d'accomplir certaines actions spécifiques (e.g., mettre la casserole sur la table) afin de se rapprocher d'une situation de SPT classique (condition active-SPT). Ce groupe serait alors comparé sur les différentes mesures du HOMES test avec un groupe qui a contrôle total sur la navigation (condition navigation active). Ces deux groupes seront comparés à un groupe contrôle en conditions passive. Si l'effet de la navigation active est obtenue de nouveau sur les mesures comme la reconnaissance et une diminution des fausses reconnaissances de manière identique la condition active-SPT, alors nous pouvons mettre en évidence un lien plus fort encore et plus directe entre l'effet SPT et la navigation active. Ce type de procédure nous permettrait également d'apporter un soutien plus important à l'explication en termes de traitement item-spécifique et relationnel.

Enfin, sur *le plan neurocognitif*, les procédures que nous venons de décrire n'ont pas encore été examinées afin de rendre compte des mécanismes aussi bien cognitifs que neurofonctionnels de la navigation active. Comme nous l'avons mentionné, les études existantes en la matière sont à ce jour, peu nombreuses. Nos protocoles couplés aux techniques de neuroimagerie pourrait alors non seulement de répliquer les résultats de Voss et al. (2011), mais également d'examiner si les substrats neuroanatomiques d'une condition active-SPT sont identiques à ceux d'une condition active classique en RV. De plus, l'utilisation de la RV nous donne une opportunité unique d'examiner l'interaction entre les processus visuels, attentionnels et la mémoire. De cette manière, il sera également possible d'examiner l'hypothèse que la navigation active découle d'une interaction entre le cortex pariétal postéro-ventral et la voie pariéto-prémotrice (Kravitz et al., 2011), et que ces deux voies sont différenciellement impliquées dans la reconnaissance des objets chez les jeunes et chez les âgés.



### **III. Limites du travail**

La présente thèse s'était donné pour objectifs d'investiguer la mémoire quotidienne dans le vieillissement normal et les neuropathologies, mais également l'interaction entre la motricité et la cognition. Cependant, elle n'est pas sans présenter quelques limites que nous décrivons dans la présente section.

Jusqu'à ce jour, les tests cliniques existant permettent d'étudier les processus mnésiques, et nous avons utilisé la RV pour mieux les appréhender dans le cadre théorique proposé par la mémoire quotidienne. Or, nous ne savons pas si ces processus fonctionnent d'une certaine manière parce que la procédure ou le mode d'administration du test les y oblige d'une certaine manière ou parce que ces processus fonctionnent de manière générale indépendamment de la procédure, et dans ce cas, tout aussi bien dans la vie quotidienne. Par exemple, nous avons vu que l'interférence proactive n'est pas toujours majorée chez les âgés en fonction de la procédure ou du paradigme utilisé. Or bien qu'une procédure générale correspondant à une opérationnalisation de la définition de l'interférence proactive soit mise en place (l'apprentissage d'une liste partageant des catégories sémantiques ou pas avec celui d'une seconde liste, celui-là venant gêner celui-là), comment pouvons nous être certains qu'il s'agit bien d'un effet d'interférence si la magnitude de cet effet ne correspond pas à celui attendu dans une population ? Ces questions posent le problème de la validité de construit, c'est-à-dire, le degré avec lequel un test mesure bien le construit théorique qu'il est censé mesurer (Cronbach & Meehl, 1955). Pour assurer la validité de construit des tests, surtout dans le domaine de la mémoire quotidienne, il faudrait comparer les résultats obtenus sur le HOMES test non seulement avec les tests traditionnels comme le CVLT, mais également avec des environnements réels.

Le second point est celui de la validité écologique : dans nos études, nous avons adopté essentiellement la méthode vérisimilaire en construisant un environnement simulant la réalité, mais également en y implémentant une activité comme la visite de l'appartement. Ceci ne nous a pas empêchés d'y intégrer une méthode comportementale objective pour collecter les mesures se rapportant à divers processus mnésiques. Nous y avons également ajouté la véridicalité en étudiant la relation de ces mesures écologiques avec les plaintes subjectives. Cette approche mixte de validité écologique est bien entendu limitée dans la présente thèse, car nous n'avons pas mesuré le transfert des mesures en RV sur un appartement réel d'une part, et d'autre part, nous n'avons utilisé qu'un seul questionnaire de plainte. Il serait donc intéressant à l'avenir d'administrer plusieurs mesures subjective de plaintes non seulement

mnésiques mais également cognitives de manière plus générale afin d'asseoir la validité écologique de manière plus solide.

Dans deux de nos études (*étude 1 et 4*), nous avons également un pool de participants limité par groupe, et cela va sans dire que le risque d'une erreur de type I est plus important, couplé à une puissance de l'étude diminuée. Nous comptons par conséquent tester nos hypothèses dans nos prochaines études avec un pool plus important de participants. Il sera également nécessaire de déterminer cette quantité de participants en fonction du calcul à priori de la puissance, et non à postériori.

Les études que nous avons présentées examinaient surtout l'hypothèse exécutive du déclin mnésique. Et *l'étude 1* nous a permis de tester celle-ci contre l'hypothèse de la réduction de la vitesse de traitement. Cependant, nous ne présentions qu'une rangée limitée de tests. Afin de tester ces hypothèses de manière plus solide, les prochaines études nécessiteront l'administration d'une batterie de tests neuropsychologiques aussi bien pour mesurer le fonctionnement exécutif que pour mesurer la vitesse de traitement.

Enfin, dans notre procédure d'évaluation de la mémoire épisodique quotidienne basée sur la RV, nous envisageons également d'y inclure un rappel indicé et un rappel libre différé permettant d'avoir, respectivement, une mesure complémentaire des traitements relationnels, et des mesures de consolidation de la mémoire, un point que nous avons volontairement éludé dans la présente thèse. Cela enrichirait le HOMES test en processus mnésiques évalués et permettrait d'augmenter la valeur diagnostic de ce test dans le cadre clinique.

#### **IV. Conclusion générale**

La présente thèse s'était donnée pour objectif d'examiner l'effet de l'âge sur diverses composantes de la mémoire épisodique lorsque celle-ci est intégrée dans une activité proche de la vie quotidienne comme la visite d'un appartement ainsi que ses bases cognitives. L'utilisation de la RV nous a également permis d'étudier l'interaction entre la motricité et la cognition. La mise en place d'une procédure basée sur la RV pour évaluer la mémoire quotidienne n'est pas nouvelle, cependant notre thèse apporte une contribution que nous pensons non négligeable dans la mesure où nous avons implémenté le paradigme de rappel libre multi-essais permettant de capturer plusieurs processus mnésique en une seule fois.

Le fait de constater une constance dans le pattern des performances des âgés dans l'ensemble des études permet également de supporter fortement la validité non seulement de ce paradigme, mais aussi celui en partie du construit qu'il mesure : il semblerait que les âgés présentent un profil mnésique surtout déterminé par le déclin du fonctionnement exécutif. En

mettant en évidence des patterns similaires entre les patients avec un TC et les âgés d'une part, mais des patterns de performances distincts entre les patients avec une MA et les âgés d'autre part, et conformes à la littérature, nous apportons un argument solide en faveur de cette validité, mais nous constatons également que le HOMES test présente une valeur clinique, et dont le développement pourrait aboutir à de meilleures contributions au diagnostic différentiels dans diverses pathologies affectant la mémoire.

Enfin, grâce au HOMES test, nous avons également pu examiner l'interaction entre la motricité et la mémoire, et de manière plus générale la cognition. Nous nous sommes limités à l'effet de la navigation active, et nos résultats ont permis de suggérer que cet effet pourrait être la conséquence de la mise en place de traitements item-spécifiques. Une hypothèse qu'il faudrait approfondir à l'avenir. Cependant, une utilisation appropriée de la RV ouvre des perspectives nouvelles et des voies extraordinaires en psychologie et en neurosciences cognitives aussi bien du point de vue méthodologique que théorique. Cette technologie pourrait nous permettre d'approfondir nos connaissances sur la manière dont fonctionne la mémoire dans la vie quotidienne sur le plan cognitif comme sur le plan neurofonctionnel.

---

---

## REFERENCES

---

---

## A

---

- Abe, N., Fujii, T., Nishio, Y., Iizuka, O., Kanno, S., Kikuchi, H., ..., & Mori, E. (2011). False item recognition in Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, *49* (7), 1897-1902
- Achim., A.M., & Lepage, M. (2005). Dorsolateral prefrontal cortex involvement in memory post-retrieval monitoring revealed in both item and associative recognition tests. *Neuroimage*, *24*, 1113-1121.
- Ackerman, C. M., & Courtney, S. M. (2012). Spatial relations and spatial locations are dissociated within prefrontal and parietal cortex. *Journal of Neurophysiology*, *108*, 2419-2429
- Adams, R., Finn, P., Moes, E., Flannery & Rizzo, A.S. (2009). Distractibility in attention/ deficit/ hyperactivity disorder (ADHD): The virtual reality classroom. *Child Neuropsychology*, *15*, 120-135.
- Aggleton, J. P., & Brown, M. W. (1999). Episodic memory amnesia and the hippocampal-anterior thalamic axis. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 425-444.
- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1997). Environmental knowledge is subserved by separable dorsal/ventral neural area. *Journal of Neuroscience*, *17*, 2512-2518.
- Albinet, C.T., Boucard, G., Bouquet, C.A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging: How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition*, *79*, 1-11.
- Allan, K., Wolf, H.A., Rosenthal, C.R., & Rugg, M.D. (2001). The effect of retrieval cues on post-retrieval monitoring in episodic memory: An electrophysiological study. *Cognitive Brain Research*, *12*, 289-299.
- Allen, T.A., & Fortin, N.J. (2013). The evolution of episodic memory, *PNAS*, *110* (suppl 2), 10379-10386.
- Ally, B.A., Gold, C.A., & Budson, A.E. (2009). An evaluation of recollection and familiarity in Alzheimer's disease and mild Cognitive impairment using receiver operating characteristics. *Brain and Cognition*, *69*, 504-513.
- Aly, M., Yonelinas, A.P., Kishiyama, M.M., & Knight, R. (2011). Damage to the lateral prefrontal cortex impairs familiarity but not recollection. *Behavioral Brain Research*, *225*(1), 297-304.
- Anastasi, A.(1954/1988). *Psychological Testing*. Oxford, England: Macmillan.
- Anderson, J. R., & Bower, G. H. (1972). Recognition and retrieval processes in free recall. *Psychological Review*, *79*, 97-123.
- Anderson, M. C., Bjork, E. L., & Bjork, R. A. (2000) Retrieval-induced forgetting: Evidence for a recall

specific mechanism. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 522-530.

Anderson, N.D., Ebert, P., Jennings, J., Grady, C., Cabeza, R., Graham, S.J. (2008). Recollection and familiarity-based memory in healthy aging and amnesic mild cognitive impairment, *Neuropsychology*, 22 (2), 177-187.

Andrès P, Van der Linden M (2000) Age-related differences in supervisory attentional system functions. *Journal of Gerontology, series B, Psychological Science*, 55, 373-380

Aristote. (1953). *Petits traités d'histoire naturelle*. Editions René Mugnier, Collection Budé.

Arndt, J., & Reder, L. M. (2003) The effect of distinctive visual information on false recognition. *Journal of Memory and Language*, 48, 1-15.

Artaud, A. (1938). *Le Théâtre et son double*, Gallimard, Paris. rééd. Folio/essais (no 14), 1985.

Atkinson, R. C., & Juola, J. F. (1974). Search and decision processes in recognition memory. In D. Krantz, R. Atkinson, R. Luce, & P. Suppes (Eds.). *Contemporary developments in mathematical psychology (Vol. 1)*. San Francisco: W.H. Freeman.

Atkinson, R.C.; Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In Spence, K.W.; Spence, J.T. *The psychology of learning and motivation (Volume 2, pp. 89–195)*. New York: Academic Press.

.

## B

---

Bäckman, L., & Nilsson, L.-G. (1984). Aging effects in free recall: An exception to the rule. *Human Learning*, 3, 53–69

Backman, L. (1985). Further evidences for the lack of adult age differences on free recall of subject-performed tasks: The importance of motor action. *Human Learning*, 4, 79–87.

Bäckman, L., Small, B.J., & Fratiglioni, L. (2001). Stability of the preclinical episodic memory deficit in Alzheimer's disease. *Brain*, 124 (1), 96 -102.

Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory (Vol. 8, pp. 47–89)*. New York: Academic Press.

Baddeley H., Vargha-Khadem F., & Mishkin, M. (2001). Preserved recognition in a case of developmental amnesia: Implications for the acquisition of semantic memory?. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(3), 357 - 369.

- Baddeley, A. (1995). *Human memory : theory and practice* (revised edition). Sussex, UK: Psychology Press.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2005). Frontal lobe mechanisms that resolve proactive interference. *Cerebral Cortex*, *15*(12), 2003–2012.
- Bakdash, J. Z., Linkenauger, S. A., & Profitt, D. (2008). Comparing decision-making and control for learning a virtual environment: Backseat drivers learn where they are going. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, *52*, 2117–2121.
- Baldo, J.V., Delis, D., Kramer, J., & Shimamura, A.P. (2002). Memory performance on the California Verbal Learning Test–II: Findings from patients with focal frontal lesions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *8*, 539–546.
- Balota, D. A., Cortese, M. J., Duchek, J. M. Adams, D., Roediger, H. L., III, McDermott, K. B., & Yerys, B. E. (1999). Veridical and false memories in healthy older adults and in dementia of the Alzheimer's Type. *Cognitive Neuropsychology*, *16*, 361–384.
- Banaji, M. R., & Crowder, R. G. (1989). The bankruptcy of everyday memory. *American Psychologist*, *44*, 1185-1193.
- Barber, S.J., & Rajaram, S. (2011). Exploring the relationship between retrieval disruption from collaboration and recall. *Memory*, *19* (5), 462-469.
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986).The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research – Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, *51*(6),1173–1182.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bastin C., Kerrouche N., Lekeu F., Adam S., Guillaume B., Lemaire C., et al. (2010). Controlled memory processes in questionable Alzheimer's disease: a view from neuroimaging research. *Journal of Alzheimer's Disease*, *20*, 547–560.
- Baudic,S., Barba,G.D., Thibaudet,M.C., Smagghe,A., Remy,P. & Traykov,L. (2006). Executive function deficits in early Alzheimer's disease and their relations with episodic memory. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *21*(1),15-21.
- Baudouin, A., Clarys, D., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2009). Executive functioning and processing speed in age-related differences in memory: Contribution of a coding task. *Brain and Cognition*, *71*, 240-245.
- Baumann, O.,Chan, Edgar., & Mattingley, J.B. (2010) Dissociable neural circuits for encoding and retrieval of object locations during active navigation in humans. *NeuroImage*, *49*(3), 2816-2825.
- Becker, S., & Lim, J. (2003). A Computational Model of Prefrontal Control in Free Recall: Strategic

Memory Use in the California Verbal Learning Task *Journal of Cognitive Neuropsychology*, (15) 6, 821-832.

Berenbaum, S.A., Baxter, L., Seidenberg, M., Hermann, B. (1997). Role of the hippocampus in sex differences in verbal memory: Memory outcome following left anterior temporal lobectomy, *Neuropsychology*, 11(4), 585-591.

Belleville, S., Peretz, I., Arguin, M., Fontaine, F., Lussier, I., Goulet, P., & Joanette, Y. (1992). Assessment of semantic processing in patients with Alzheimer's type dementia: The release of proactive-inhibition paradigm. *Neuropsychology*, 6, 29–41.

Belli, R. F. (1989). Influences of misleading postevent information: Misinformation interference and acceptance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 72–85.

Benedict, R.H.B., Schretlen, D., Groninger, L., Dobraski, M., & Shpritz, M. (1996). Revision of the Brief Visuospatial Memory Test: Studies of normal performance, reliability, and validity. *Psychological Assessment*, 8 (2), 145-153.

Bergson, H. (1896). *Matière et mémoire*. Paris : Presse Universitaire de France

Binder, J.R. , Desai, R.H., Graves, W.W., & Conant, L. (2009). Where Is the Semantic System? A Critical Review and Meta-Analysis of 120 Functional Neuroimaging Studies, *Cerebral Cortex*, 19:2767--2796.

Birren, J.E, & Bengston, V.L (Eds.), (1988). *Emergent theories of aging* (pp. 177-213). New York: Springer

Binetti, G., Cappa, S.F., Magni, E., Padovani, A., Bianchetti, A., & Trabucchi, M. (1996). Disorders of visual and spatial perception in the early stage of Alzheimer's disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 777, 221–225.

Bird, C. M., Shallice, T., & Cipolotti, L. (2007). Fractionation of memory in medial temporal lobe amnesia, *Neuropsychologia*, 45(6), 1160–1171.

Berryhill, M.E., Phuong, L., Picasso, L., Cabeza, R., & Olson, I.R. (2007). Parietal lobe and episodic memory: bilateral damage causes impaired free recall of autobiographical memory. *The Journal of Neuroscience*, 27 (52), 14415-14423.

Blumenfeld, R.S., Parks, C.M., Yonelinas, A.P., & Ranganath, C. (2010). Putting the pieces together: the role of dorsolateral prefrontal cortex in relational memory encoding. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23 (1), 257-65.

Blumenfeld, R.S., Ranganath, C. (2007). Prefrontal cortex and long-term memory encoding: an integrative review of findings from neuropsychology and neuroimaging. *Neuroscientist*, 13 (3), 280–291.



- Bousfield, W. (1953). The occurrence of clustering in the recall of randomly arranged associates. *Journal of General Psychology*, *49*, 229-240.
- Bousfield, A.K. & Bousfield, W.A. (1966). Measurement of clustering and of sequential constancies in repeated free recall. *Psychological Reports*, *19*, 935–942.
- Bower, G. G., Lesgold, A. M., Tieman, D. (1969). Grouping operations in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *8*, 481–493.
- Braak, H., & Braak, E. (1991). Neuropathological staging of Alzheimer-related changes. *Acta Neuropathologica*, *82* (4), 239-259.
- Braver, T.S., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F.I.M. Craik & T.A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (pp.311-372). Hove: Psychology Press.
- Brodie, D.A., & Prytulak, L.S. (1975). Free recall curves: Nothing but rehearsing some items more or recalling them sooner ? *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*, 549-563.
- Brooks, B.L., Weaver, L.E., & Scialfa, C.T. (2006). Does impaired executive functioning differentially impact verbal memory measures in older adults with suspected dementia ? *The Clinical Neuropsychologist*, *20*, 230-242.
- Brooks, B.M., & Gardiner, J.M. (1994). Age differences in memory for prospective compared with retrospective subject-performed tasks. *Memory & Cognition*, *22*(1), 27-33
- Bruce , D. (1985). The how and why of ecological memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *114*, 78-90.
- Brugge, K. L., Nichols, S. L., Salmon, D. P., Hill, L. R., Delis, D. C., Aaron, L., & Trauner, D. A. (1994). Cognitive impairment in adults with Down's syndrome: Similarities to early cognitive changes in Alzheimer's disease. *Neurology*, *14*, 232-238.
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free recall performance. *Psychology and Aging*, *11*, 3–9.
- Bugaiska, A., Clarys D., Jarry, C., Tacconat, L., Tapia, G., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2007). The effect of aging in recollective experience: the processing speed and executive functioning hypothesis. *Consciousness and Cognition*, *16* (4), 797-808.
- Buchler, N.G., Light, L.L., & Reder, L.M. (2008) Memory for items and associations: Distinct representations and processes in associative recognition. *Journal of Memory and Language*, *59* (2), 183–199.
- Budson, A.E., Daffner, K.R., Desikan, R., & Schacter, D.L. (2000). When false recognition is unopposed by true recognition: Gist-based memory distortion in Alzheimer's disease.

*Neuropsychology*, 14 (2), 277-287.

Budson, A.E., Daffner, K.R., Desikan, R., & Schacter, D.L. (2000). When false recognition is unopposed by true recognition: Gist-based memory distortion in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 14 (2), 277-287.

Budson, A. E., Sullivan, A. L., Mayer, E., Daffner, K. R., Black, P. M., & Schacter, D. L. (2002). Suppression of false recognition in Alzheimer's disease and in patients with frontal lobe lesions. *Brain*, 125, 2750–2765

Budson, A. E., Sullivan, A. L., Daffner, K. R., & Schacter, D. L. (2003). Semantic versus phonological false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Brain and Cognition*, 51, 251–261

Budson, A. E., Todman, R.W., & Schacter, D. L. (2006). Gist memory in Alzheimer's disease: Evidence from categorized pictures. *Neuropsychology*, 201 (1), 113-122.

Burns, D. J. (2006). Assessing distinctiveness: Measures of item-specific and relational processing. In R.R. Hunt & K. Worthen (Eds.). *Distinctiveness and Memory*. New York: Oxford University Press.

Burns, D. J. (1989). Proactive interference: An item-specific versus relational processing account. *Journal of Memory and Language*, 28, 345–359.

Buxbaum, L.J., Dawson, A.M., & Linsley, D. (2012). Reliability and validity of the Virtual Reality Lateralized Attention Test in assessing hemispatial neglect in right hemisphere stroke. *Neuropsychology*, 26 (4), 430-441,

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, 65–78.

Bhatt, R., Laws, K. R. & McKenna, P. J. (2010). False memory in schizophrenia patients with and without delusions. *Psychiatry Research*. 178 (2), 260-265.

Bennett-Levy J., & Powell, G.E. (1980): The subjective memory questionnaire (SMQ). An investigation into the self-reporting of 'real-life' memory skills. *British Journal of the Society of Clinical Psychology* 19, 177–188

Berthoz, A. (1999) Parietal and hippocampal contribution to topokinetic and topographic memory. In Burgess, N., Jeffery, K.J., O'Keefe, J. (Eds) *The hippocampal and parietal foundations of spatial cognition*, (pp. 381-403). Oxford: Oxford University Press.

Barnes, J.M., & Underwood, B.J. (1959). « Fate » of first-list associations in transfer theory. *Journal of Experimental Psychology*, 58(2), 97-105

Botwinick, J. & Storandt, M. (1980). Recall and recognition of old information in relation to age and sex. *Journal of Gerontology*, 35, 70-76

- Bondi, M.W., Salmon, D.P., Monsch, A.U., Galasko, D., Butters, N., Klauber, M.R.,..., & Saito, T. (1995). Episodic memory changes are associated with the APOE-e4 allele in nondemented older adults. *Neurology*, *45*, 2203–2206.
- Bowman, D., Gabbard., J. Hix, D. (1996). A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *11*(4), 404-424.
- Brown, L. A., Brockmole, J. R., Gow, A. J., & Deary, I. J. (2012). Processing speed and visuo-spatial executive function predict visual working memory in older adults. *Experimental Aging Research*, *38*, 1-19.
- Buckner, R. L., Koutstaal, W., Schacter, D. L., Wagner, A. D., and Rosen, B. R. (1998). Functional-anatomic study of episodic retrieval using fMRI. I. Retrieval effort versus retrieval success. *NeuroImage* *7*: 151–162
- Burgess N., Maguire E.A., O'Keefe J (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, *35*, 625–641
- Burgess, N., Becker, S., King, J.A., and O'Keefe, J. (2001). Memory for events and their spatial context: models and experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series B, Biological Science*, *356*, 1493–1503.
- Butler, K.M., McDaniel, M.A., McCabe, D.P., & Dornburg, C.C (2010). The influence of distinctiveprocessing manipulations in older adults' false memory. *Aging, Neuropsychology, & Cognition*, *17* (2), 129-159.
- Buzsáki, G., & Moser, E.I. (2013). Memory, navigation and theta rhythm in the hippocampal-entorhinal system. *Nature Neuroscience*. *16*(2), 130-138.

## C

---

- Cabeza, R. (2008). Role of parietal regions in episodic memory retrieval: The dual attentional processes hypothesis. *Neuropsychologia*, *46*, 1813-1827.
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in old adults: The HAROLD Model. *Psychology and Aging* *17*, 85–100.
- Cabeza, R., Grady, C.L., Nyberg, L., McIntosh, A.R., Tulving, E., Kapur, S., ..., & Craik, F.I.M. (1997). Age-related differences in neural activity during memory encoding and retrieval: A Positron Emission Tomography study. *Journal of Neuroscience*, *17* (1), 391-400.
- Cabeza, R., Ciaramelli, E., Olson, I.R., & Moscovitch, M. (2008) The parietal cortex and episodic

memory: an attentional account. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(8), 613-25.

Cameron, T. & Hockley, W.E. (2000). The revelation effect for item and associative recognition: Familiarity versus recollection. *Memory & Cognition*, 28, 176-183.

Cao, X., Douguet, A.S., Fuchs, P., & Klinger, E. (2010), Designing an ecological and adaptable virtual task in the context of executive functions: Preliminary study. In: Proceedings 8th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Associated Technologies, In *Proceedings 8th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Associated Technologies*, Viña del Mar/Valparaiso, Chile.

Carr, D.B., Gray, S., Baty, J., & Morris, J.C. (2000). The value of informant vs. individual's complaints of memory impairment in early dementia. *Neurology*, 55, 1724-1726.

Carriere, J., Cheyne, S.A., Solman, G.J.F., & Smilek, D. (2010). Age trends failures of sustained attention. *Psychology and Aging*, 25(3), 569-574

Ceci, S. J., & Bronfenbrenner, U. (1991). On the demise of everyday memory: "The rumors of my death are much exaggerated." *American Psychologist*, 46, 27-31.

Cepeda, N. J., Blackwell, K. A., & Munakata, Y. (2013). Speed isn't everything: Complex processing speed measures mask individual differences and developmental changes in executive control. *Developmental Science*, 16, 269-286.

Chao LL, Knight RT. (1997). Prefrontal deficits in attention and inhibitory control with aging. *Cerebral Cortex*, 7 (1), 63–69.

Charness N. (2008). Aging and human performance. *Human Factors*, 50(3), 548–55.

Chaytor, N. & Schmitter-Edgecombe, M. (2003). The ecological validity of neuropsychological testing: A review of the literature on everyday cognitive skills. *Neuropsychological Review*, 13 (4), 181-197.

Chen, J.G., Edwards, C.L., Vidhyarti, S., Pitchumoni, S., Tabrizi, S., Barboriak, D.,..., & Doraiswamy, M. (2002). Learning and recall in subjects at genetic risk for Alzheimer's disease. *Journal of Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 14 (1), 58-63.

Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 1–23.

Chua, E.F., Schacter, D.L., Rand-Giovanetti, E., & Sperling ,R.A. (2007). Evidence for a specific role of the anterior hippocampal region in successful associative encoding. *Hippocampus*, 17(11), 1071–1080.

Chua, E.F., Schacter, D.L., Rand-Giovanetti, E., & Sperling, R.A. (2007). Evidence for a specific role of the anterior hippocampal region in successful associative encoding. *Hippocampus*, 17, 1071-80.

Ciaramelli, E., Grady, C.L., & Moscovitch, M. (2008) Top-down and bottom-up attention to memory: a hypothesis (AtoM) on the role of the posterior parietal cortex in memory retrieval. *Neuropsychologia*,

46(7), 1828-51.

Cirio, G., Vangorp, P., Marchal, M., Chapoulie, E., Lécuyer, L., & Drettakis, G. (2012). Walking in a Cube: Novel Metaphors for Safely Navigating Large Virtual Environments in Restricted Real Workspaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proceedings of IEEE Virtual Reality)*, 18(4):546– 554.

Clément, F., Belleville, S., & Gauthier, S. (2008). Cognitive complaint in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 14 (2), 222-232

Cohen, G. (2008). The study of everyday memory. In G. Cohen & M.A. Conway. *Memory in the Real World (3rd Edition)* (pp. 1-20). London: Psychology Press

Cohen, G., & Conway, M.A. (eds.). (2008) *Memory in the Real World* (3rd Edition) London: Psychology Press

Cohen, R. L. (1983). The effect of encoding variables on the free recall of words and action events. *Memory & Cognition*, 11, 575-582.

Cohn, M., Moscovitch, M., & Davidson, P. S. (2010). Double dissociation between familiarity and recollection in Parkinson's disease as a function of encoding tasks. *Neuropsychologia*, 48(14), 4142–4147.

Collins, A.M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82 (6), 407-428

Comblain, A. (1996). Le fonctionnement de la mémoire de travail dans le syndrome de Down: Implications pour le modèle de mémoire de travail. *Approches Neuropsychologiques des Apprentissages de l'Enfant*, 39-40, 137-147.

Constantinidou, F., & Baker, S. (2002). Stimulus modality and verbal learning performance in normal aging. *Brain and Language*, 82, 296-311.

Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1994). Working memory and retrieval: A resource-dependent inhibition model. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123, 354-373.

Conway, M. A. (1991). In defense of everyday memory: A reply to Banaji and Crowder. *American Psychologist*, 46, 19-26.

Conway, M. A., & Pleydell-Pearce, C. W. (2000). The construction of autobiographical memories in the self-memory system. *Psychological Review*, 107(2), 261-288.

Conway, M.A. (2009). Episodic memories. *Neuropsychologia*, 47 (11), 2305-2313.

Coons, Philip M. (1994) Reports of satanic ritual abuse: further implications about pseudomemories. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 1376-1378.

- Corbetta, M., Shulman, G.L. (2002) Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience* 3, 201-215
- Craig, K.S., Berman, M.G., Jonides, J., & Lustig, C. (2013) Escaping the recent past: Which stimulus dimensions influence proactive interference? *Memory & Cognition*, 41 (5), 650-670.
- Craik, F. I. M., & Simon. E. (1980). The roles of attention and depth of processing. In L. W. Poon, J. L. Fozard, L. Cermak, D. Arenberg, & L. W. Thompson (Eds.). *New directions in memory and aging. Proceedings of the George Tolland memorial conference*. Hillsdale. NJ: Erlbaum.
- Craik, F. I. M., & McDowd, J. M. (1987). Age Differences in Recall and Recognition. *Journal Of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 13, 473-479.
- Craik, F.I.M. & Lockhart, R.S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 11, 671-684.
- Craik, F.I.M., & McDowd, J.M. (1987). Age differences in recall and recognition. *Journal Of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 13, 473-479.
- Craik, F.I.M., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104 (3), 268-294.
- Cramer, P. and Eagle, M. (1972). Relations hip between conditions of CRS presentation and the category of false recognition errors. *Journal of Experimental Psychology*, 94, 1-5.
- Crastil, E.R., & Warren, W.H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 1-23.
- Crawford, J. R., Henry, J. D., Ward, A. L., & Blake, J. (2006). The Prospective and Retrospective Memory Questionnaire (PRMQ): Latent structure, normative data and discrepancy analysis for proxy-ratings. *British Journal of Clinical Psychology*, 45, 83-104.
- Crawford, J.R., Bryan, J., Luszcz, M.A., Obonsawin, M.C., & Stewart, L. (2000). The executive decline hypothesis of cognitive aging: do executive deficits qualify as differential deficits and do they mediate age-related memory decline? *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7(1), 9-31.
- Cronbach, L. J., & Meehl, P.E. (1955). Construct validity in psychological tests. *Psychological Bulletin*, 52, 281-302.
- Curtis, C. E. and M. D'Esposito (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Science*, 7(9): 415-423.
- 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.
- Czaja SJ, Charness N, Fisk AD, Hertzog C, Nair SN, Rogers WA, 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, 333–52.

## D

---

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, 99–114.

Dalla Barba, G., Nedjam, Z., & Dubois, B. (1999). Confabulation, executive functions and source memory in Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 16, 385–398.

Danckert, S.L., & Craik, F.I.M. (in press). Does aging affect recall more than recognition memory? *Psychology and Aging*,

Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Penguin Classics UK, 2009.

Davachi, L. (2006). Item, context, and relational encoding in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 16, 693–700

Davachi, L., Maril, A., & Wagner, A.D. (2001). When Keeping in mind supports later bringing in mind: neural markers of phonological rehearsal predict subsequent remembering. *Journal of Cognitive Neuroscience* 13 (8), 1059–1070.

Davidson, P.S. and Glisky, E.L. (2002) Is flashbulb memory a special instance of source memory? Evidence from older adults. *Memory*, 10, 99–111.

Davis, H.P., Small, S.A., Stern, Y., Mayeux, R., Simeon, N.F., Feldstein, S.N., & Keller, F.R. (2003). Acquisition, recall, and forgetting of verbal information in long-term memory by young, middle-aged, and elderly individuals. *Cortex*, 39, 1063–1091

Deary, I.J., Johnson, W., & Starr, J.M. (2010). Are processing speed tasks biomarkers of cognitive aging? *Psychology and Aging*, 25(1), 219–228

DeCarli C, Frisoni GB, Clark CM, Harvey D, Grundman M, Petersen RC, et al. (2007). Qualitative estimates of medial temporal atrophy as a predictor of progression from mild cognitive impairment to dementia. *Archives of Neurology*, 64, 108–115.

DeCarlo, L. (2010). On the statistical and theoretical basis of the signal detection theory and extensions: unequal variance, random coefficient and mixture models. *Journal of Mathematical Psychology*, 54, 304–313.

Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 17–22.

- Déjos M., Sauzéon, H, & N'Kaoua., B. (2012). La réalité virtuelle au service de l'évaluation clinique de la personne âgée : le dépistage précoce de la démence. *La revue Neurologique*, 168, 404-414.
- Delboeuf, J. (1885). *Le sommeil et les rêves considérés principalement dans leur rapport avec les théories de la certitude et de la mémoire*. Paris: Félix Alcan.
- Delis, D. C., Cullum, M., Butters, N., Cairns, P., & Prifitera, A. (1988). Wechsler Memory Scale—Revised and California Verbal Learning Test: Convergence and divergence. *The Clinical Neuropsychologist*, 2, 188–196.
- Delis, D., Kaplan, E., Kramer, J., & Ober, B. (1987). *California Verbal Learning Test*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Delis, D., Kaplan, E., Kramer, J., & Ober, B. (2000). *California Verbal Learning Test* (2nd Ed.). San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Delis, D.C., Massman, P.J., Butters, N., & Salmon, D.P. (1991). Profiles of demented and amnesic patients on the California verbal learning test: Implications for the assessment of memory disorders. *Psychological Assessment*, 3 (1), 19-26.
- DeLuca, J., Schultheis, M.T., Madigan, N.K., Christodoulou, C., & Averill, A. (2000). Acquisition versus retrieval deficits in traumatic brain injury: implications for memory rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81 (10), 1327-1333.
- Denis, M., Engelkamp, J., & Mohr, G. (1991). Memory of imagined actions: Imagining oneself or another person. *Psychological Research*, 53, 246-250.
- Dennis NA, Cabeza R. (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. In: T.A. Salthouse, F.I.M. Craik, (eds).. *Handbook of aging and cognition*. 3rd ed. pp. 1–54. UK: Erlbaum.
- Dennis, N. A., Hayes, S. M., Prince, S. E., Madden, D. J., Huettel, S. A., & Cabeza, R.(2008). Effects of aging on the neural correlates of successful item and source memory encoding. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 34, 791-808.
- Diana, R. A., Yonelinas, A. P., & Ranganath, C. (2007). Imaging recollection and familiarity in the medial temporal lobe: A three-component model. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 379–386.
- Dickens, C. (1843). *A Christmas carol*. Editions Projet Gutenberg, Retrieved from <http://www.gutenberg.org/ebooks/46>.
- Dierckx, E., Engelborghs, S., De Raedt, R., De Deyn, P. P., & Ponjaert-Kristoffersen, I. (2007). Differentiation between Mild Cognitive Impairment, Alzheimer's disease and depression by means of cued recall. *Psychological Medicine*, 37, 747-755.
- DiGirolamo, G.J., Kramer, A.F., Barad, V., Cepeda, N.J., Weissman, D.H., Milham M.P.;..., & McAuley, E. (2001) General and task-specific frontal lobe recruitment in older adults during executive



processes: a fMRI investigation of task-switching. *NeuroReport* 12, 2065–2071.

Dijkstra, K., & Kaschak, M.P. (2006). Encoding in verbal, enacted and autobiographical tasks in young and older adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(8), 1338-45

Diwadkar, V. A., & McNamara, T. P. (1997). Viewpoint dependence in scene recognition. *Psychological Science*, 8, 302-307.

Dobbins, I.G., Foley, H., Schacter, D.L., & Wagner, A.D. (2002) Executive control during episodic retrieval: Multiple prefrontal processes subserve source memory. *Neuron*, 35, 989-996.

Dodd, M. D., & MacLeod, C. M. (2004). False recognition without intentional learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 137–142

Dolk, H., Loane, M., Garne, E., De Walle, H., Queisser-Luft, A., de Vigan C.,..., & Bianchi, F. (2005). Tendances temporelles et inégalités géographiques pour la prévalence du syndrome de Down en Europe, 1980-1999. *Revue d'Epidémiologie et de Santé Publique*, 53 (2), 87-95.

Donders, F.C. (1869). On the speed of mental processes. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and Performance II*. Acta Psychologica, 30, 412-431. (Original work published in 1868.)

Dudukovic, N. M., DuBrow, S., & Wagner, A. D. (2009). Attention during memory retrieval enhances future remembering. *Memory & Cognition*, 37(7), 953-961.

Dywan, J. & Jacoby, L. (1990). Effects of aging on source monitoring: Differences in susceptibility of false fame. *Psychology and Aging*, 5, 379-387

.

## E

---

Eacott, M.J., Easton, A., & Zinkivskay, A. (2005). Recollection in an episodic-like memory task in the rat. *Learning & Memory*, 12, 221-223.

Eakin, D.K., & Smith, R. (2012). Retroactive interference effects in implicit memory. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition*, 38(5), 1419-24.

Ebbinghaus, H. (2011). *La mémoire. Recherches de psychologie expérimentale*, Ed.: L'Harmattan. Traduction française du travail original datant de 1885.

Ebert, P.L., & Anderson, N.D. (2009). Memory interference in young adults, healthy older adults, and older adults with amnesic Mild Cognitive Impairment. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 15(1), 83-93.

Edgin, J.O., Pennington, B.F., Mervis, C.B. (2010). Neuropsychological component of intellectual

- disability : the contribution of immediate working, and associative memory. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(5), 406-417.
- Edmonds, E. C., Glisky, E.L., Bartlett, J.C., & Rapcsak, S.Z. (2012). Cognitive mechanisms of false facial recognition in older adults. *Psychology and Aging*, 27(1), 54-60.
- Eich, E. (1995). Mood as a mediator of place dependent memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 293-308.
- Eichenbaum, H. (1997). Declarative memory: insights from cognitive memory in the rat. *Annual Review of Psychology*, 48, 547–572.
- Eichenbaum, H. (2004). Hippocampus: Cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory. *Neuron*, 44, 109–120.
- Einstein, G.O., & Hunt, R. R.(1980). Levels of Processing and Organization: Additive Effects of Individualitem and Relational Processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6, 588-598.
- Ekstrom, A.D., & Bookheimer, S.Y. (2007). Spatial and temporal episodic memory retrieval recruit dissociable functional networks in the human brain. *Learning & Memory*, 14, 645–654
- Emery, L., Hale, S., & Myerson, J. (2008). Age differences in proactive interference, working memory, and abstract reasoning. *Psychology and Aging*, 23, 634-645.
- Engelkamp, J. (2001). Action memory: A system-oriented approach. In H. D. Zimmer, R. L. Cohen, M. J. Guynn, J. Engelkamp, R. Kormi-Nouri, & M. A. Foley (Eds.), *Memory for action: A distinct form of episodic memory?* (pp. 144–150). New York: Oxford University Press.
- Engelkamp, J., & Dehn, D. M. (2000). Item and order information in subject-performed tasks and experimenter performed tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26, 671–682.
- Engelkamp, J., & Krumnacker, H. (1980). Imaginale und motorische Prozesse beim Behalten verbalen Materials [Imagery and motor processes in memory of verbal material]. *Zeitschrift fur experimentelle und angewandte Psychologie*, 27, 511-533.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1996). Organisation and recall in verbal tasks and subject-performed tasks. *European Journal of Cognitive Psychology*, 8, 257-273.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (2002). Free recall and organization as a function of varying relational encoding in action memory. *Psychological Research*, 66, 91–98.

## F

---

- Farrell, M., Arnold, M., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T. Mac-Manamon, M. (2003) Transfer of route learning from virtual to real environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9 (4), 219-227.
- Fazeindeiro, T., Winkielman, P., Luo, C., & Lorah, C. (2005). False recognition across meaning, language, and stimulus format: conceptual relatedness and the feeling of familiarity. *Memory & Cognition*, 33 (2), 249-260.
- Fechner, G.T. (1966). *Elements of Psychophysics* (vol 1). E.G. Boring & D.H. Howes (Eds. H.E. Adler, Trans.) New York: Holt? Reinhardt, Winston, (travail original publié en 1860).
- Feigenbaum, J.D., & Morris, R.G. (2004). Allocentric versus egocentric spatial memory after unilateral temporal lobectomy in humans. *Neuropsychology*, 18(3), 462-472.
- Feyereisen, P. (2009). Enactment effects and integration processes in younger and older adults' memory for actions. *Memory*, 17(4), 374-85.
- Flanagin, V.L., Wutte, M., Glasauer, S., & Jahn, K. (2009). Cortical activations during imagined passive and active whole body movement. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164, 372-375
- Fletcher, P. C. & Henson, R. N. A. (2001). Frontal lobes and human memory – insights from functional imaging. *Brain*, 124, 849-881.
- Flynn D, Van Schaik MP, Blackman T, Fencott C, Hobbs B, Calderon C. (2003). Developing a virtual reality-based methodology for people with dementia: a feasibility study. *Cyberpsychology and Behavior*, 6(6), 591–611.
- Fort, A., Martin, R., Jacquet-Andrieu, A., Combe-Pangaud, C. Foliot, G., Daligault, S. & Delpuech, C. (2010). Attentional demand and processing of relevant visual information during simulated driving: A MEG study. *Brain Research*, 1363, 117-127.
- Fortin, N.J., Agster, K.L., & Einchenbaum, H.B. (2002). Critical role of the hippocampus in memory for sequence events. *Nature Neuroscience*, 5 (5), 458-462.
- Foster, T.C., Defazio, R.A., Bizon, J.L. (2012) Characterizing cognitive aging of spatial and contextual memory in animal models. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 4 (12), doi: 10.3389/fnagi.2012.00012. eCollection 2012.
- Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C., Dolan, R., & Price, C.J. (Eds.) (2004). *Human Brain Function*, 2ndEdition. Elsevier, London.
- Franzen, M. D. (1989). *Reliability and validity in neuropsychological assessment*. (New York: Plenum)
- Franzen, M.D., & Wilhelm, K.L. (1996). Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In Sbordone, R.J., and Long, C.J. (Eds.) *Ecological validity of neuropsychological testing*. (pp. 91-112). Delray Beach, FL, England: Gr Press/St Lucie Press, Inc.

- Freud, S. (1899). *Screen memories. Standard Edition, 3*, 301-322. London: The Hogarth Press
- Friedman, M.A., Schinka, J.A., Mortimer, J.A., & Graves, A.B. (2002) Hopkins Verbal Learning Test-Revised: norms for elderly African Americans. *The Clinical Neuropsychologist, 16*(3), 356-372.
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., & Vercher, J.L. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris : Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

## G

---

- Galeone, F., Pappalardo, S., Chieffi, S., Iavarone, A., & Carlomagno, S. (2011). Anosognosia for memory deficit in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry, 26* (7), 695-701.
- Galesic, M., & Tourangeau, R. (2007). What is sexual harassment? It depends on who asks! Framing effects on survey responses. *Applied Cognitive Psychology, 21*, 189–202.
- Gallagher, M., Burwell, R., & Burchinal, M. (1993). Severity of spatial learning impairment in aging: Development of a learning index for performance in the Morris water maze. *Behavioral Neuroscience, 107*(4), 618-626.
- Gallo, D. A. (2006). *Associative illusions of memory: Research on false memory for related events*. New York: Psychology Press.
- Gallo, D. A. (2010). False memories and fantastic beliefs: 15 years of DRM illusions. *Memory & Cognition, 38* (7), 833-848
- Gallo, D. A., McDermott, K. B., Percer, J. M., & Roediger, H. L. (2001). Modality effects in false recall and false recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 27*, 339-353.
- Gardiner J.M. & Richardson-Klavehn, A. (2000). Remembering and Knowing. In Endel Tulving (ed.), *The Oxford Handbook of Memory*. Oxford University Press
- Gardiner, J. M., Gawlik, B., & Richardson-Klavehn, A. (1994). Maintenance rehearsal affects knowing, not remembering; elaborative rehearsal affects remembering, not knowing. *Psychonomic Bulletin & Review, 1*, 107-110.
- Gardiner, J.M. (2001). Episodic memory and auto-noetic consciousness: A first-person approach. *Philosophical transactions of the Royal Society of London B, 356*, 1351-1361.
- Gardiner, J.M., & Klee, H. (1976). Memory for remembered events: An assessment of output monitoring in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 15*, 227–233.

- Garoff-Eaton RJ, Kensinger EA, & Schacter DL (2007). The neural correlates of conceptual and perceptual false recognition. *Learning and Memory*, *14*, 684-692.
- Gass, C.S., & Apple, C. (1997). Cognitive complaints in closed head injury: relationship to memory test performance and emotional disturbance. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *19* (2), 290-299.
- 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*, 409-420.
- Geldmacher, D.S., & Hills, E.C. (1997). Effect of stimulus number, target-to-distractor ratio, and motor speed on visual spatial search quality following traumatic brain injury. *Brain Injury*, *11* (1), 59–66
- Geraci, L., McDaniel, M. A., Manzano, I., & Roediger, H. L. (2009). The influence of age on memory for distinctive events. *Memory & Cognition*, *37*, 175-180
- Gershberg, F.B., & Shimamura, A.P. (1995). Impaired organizational strategies in free recall following frontal lobe damage, *Neuropsychologia*, *33* (10), 1305-1333.
- Glantz, M., & Cunitz, A. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *5*, 354-360.
- Glisky E.L., Polster, M.R., & Routhieaux, B.C. (1995). Double dissociation between item and source memory. *Neuropsychology*, *9*, 229–235.
- Glisky, E.L., Kong, L.L., (2008). Do young and older adults rely on different processes in source memory tasks? A neuropsychological study. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*, 809–822.
- Glisky, E.L., Rubin, S.R. & Davidson, P.S.R. (2001) Source memory in older adults: An encoding or retrieval problem? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*, 1131-1146.
- Gold, J.J., Hopkins, R.O., Squire, L.R. (2006). Single-item memory, associative memory, and the human hippocampus. *Learning & Memory*, *13*, 644-649.
- Goldman-Rakic, P.S. (1987) Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In: Plum F, Mountcastle F (eds.) *Handbook of Physiology*, Vol 5. The American Physiological Society, Washington DC, pp 373–517.
- Goldman-Rakic, P.S. (1995). Cellular basis of working memory. *Neuron* *14* (3), 477-485
- Grady, C.L., McIntosh, A.R., Horwitz, B., Maisog, J.M., Ungerleider, L.G., Mentis, M.J., et al. (1995). Age-related reductions in human recognition memory due to impaired encoding. *Science*, *269*, 218–221.

- Graf, P. & Schacter, D.L. (1987). Selective effects of interference on implicit and explicit memory for new associations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*, 45-53.
- Green, C.M., & Soto, D. (2013). Neural repetition effect in the medial temporal lobe complex are modulated by previous encoding experience. *PloSONE*, *7*(7): e40870. doi:10.1371/journal.pone.0040870
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley,
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1988). *Signal detection theory and psychophysics* (rev. ed.). Los Altos, CA: Peninsula Publishing.
- Gregg, V. H., Montgomery, D. C., & Castaño, D. (1980). Recall of common and uncommon words from pure and mixed lists. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*, 240-245.
- Grenfell-Essam, R., & Ward, G., (2012). Examining the relationship between free recall and immediate serial recall: The role of list length, strategy use, and test expectancy. *Journal of Memory and Language*, *67*, 106-148.
- Grober, E., Buschke, H. (1987). Genuine memory deficits in dementia. *Developmental Neuropsychology*, *3*, 13-36.
- Gunning-Dixon FM, Raz N. (2003). Neuroanatomical correlates of selected executive functions in middle-aged and older adults: a prospective MRI study. *Neuropsychologia*, *41*, 1929–1941.
- Guntre, R.W., Bodner, G.E., & Azad, T. (2007). Generation and mnemonic encoding induce a mirror effect in the DRM paradigm. *Memory & Cognition*, *35* (5), 1083-1092.
- Gutchess, A.H., & Schacter, D.L. (2012). The neural correlates of gist-based true and false recognition. *NeuroImage* *59*, 3418-3426
- Gutchess, A.H., Welsh, R.C., Hedden, T., Bangert, A., Minear, M., Liu, L.L. & Park, D.C. (2005). Aging and the neural correlates of successful picture encoding: frontal activations compensate for decreased medial-temporal activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(1), 84-96.
- Guttentag, R.E., & Hunt, R.R. (1988). Adult age differences in memory for imagined and performed actions. *Journal of Gerontology*, *43*, 107-108.

## H

---

Hilgard, E.R. (1948) *Theories of Learning*. New York: Appleton-Century-Crofts.

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 University Press.
- Hassabis, D., Kumaran, D., & Maguire, E. (2007). Using imagination to understand the neural basis of episodic memory. *The Journal of Neuroscience*, 27(52), 14365-14374.
- Hasher, L., Chung, C., May, C. P., & Foong, N. (2002). Age, time of testing, and proactive interference. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56, 200–207.
- Henkel, L.A., Johnson, M.K., & De Leonardis, D.M. (1998). Aging and source monitoring: cognitive processes and neuropsychological correlates. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 251-268
- Hamilton, A. C., & Martin, R. C. (2005). Dissociations among tasks involving inhibition: A single-case study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5, 1–13.
- 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, & Cognition*, 13 (3-4), 529-551.
- Hashtroudi, S., Johnson, M. K., & Chrosniak, L. D. (1989). Aging and source monitoring. *Psychology and Aging*, 4, 106–112.
- Hoyer, W. J., & Verhaeghen, P. (2006). Memory aging. In J. E. Birren and K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging* (6th edition, pp. 209-232). Amsterdam: Elsevier.
- Hertzog, C., Dixon, R. A., Hultsch, D. F., & MacDonald, S. W. S. (2003). Latent change models of adult cognition: Are changes in processing speed and working memory associated with changes in episodic memory? *Psychology and Aging*, 18, 755-769
- Hollingworth, A. (2006). Visual memory for natural scenes: Evidence from change detection and visual search. *Visual Cognition*, 14, 781-807
- 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 the psychology of aging* (6th Edition). Amsterdam: Elsevier.
- Hildebrandt, H., Haldenwanger, A., & Eling, P. (2009). False recognition helps to distinguish patients with Alzheimer's disease and amnesic MCI from patients with other kinds of dementia. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 28, 159-167.
- Hartley, A. (2006) Changing role of the speed of processing construct in the cognitive psychology of human aging. In: J.E. Birren, & W.K. Schaie (Eds) *Handbook of the psychology of aging* (6th Edition). Amsterdam: Elsevier.
- Hertzog, C., & Hultsch, D. F. (2000). Metacognition in adulthood and old age. In F. I. M. Craik (Ed.), *The handbook of aging and cognition* (2nd ed., pp. 417–466). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

- Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. G., Gary, C., & Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting Test Manual—Revised and Expanded*. Odessa: Psychological Assessment Resources.
- Huttenlocher, J., & Newcombe, N. (1976). Semantic effects on ordered recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *15* (4), 387–399.
- Howard, M. W., Fotedar, M. S., Datey, A. V., & Hasselmo, M. E. (2005). The temporal context model in spatial navigation and relational learning: Toward a common explanation of medial temporal lobe function across domains. *Psychological Review*, *112*(1), 75–116.
- Hawthorn D. (2000). Possible implications of ageing for interface designers. *Interactions in Computers*, *12*, 507–28
- Hayman, R., & Jeffery, K. (2008) How heterogeneous place cell responding arises from homogeneous grids – a contextual gating hypothesis. *Hippocampus*, *18*, 1301-1313.
- Hildebrandt, H., Brand, A., & Sachsenheimer, W. (1998). Profiles of patients with left prefrontal and left temporal lobe lesions after cerebrovascular infarctions on California Verbal Learning Test-like indices. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *20*, 673–684.
- Hicks, J. L., & Marsh, R. L. (2000). Toward specifying the attentional demands of recognition memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *26*, 1483-1498.
- Holdstock, J.S., Crane, J., Bachorowski, J.-A, & Milner B. (2010). Equivalent activation of the hippocampus by face-face and face-laugh paired associate learning and recognition, *Neuropsychologia*, *48*, *13*, 3757-3771.
- J.S. Holdstock, A.R. Mayes, Q.Y. Gong, N. Roberts, and N. Kapur. (2005). Item recognition is less impaired than recall and associative recognition in a patient with selective hippocampal damage. *Hippocampus*, *15*, 203-215.
- Hockley, W.E, & Cristi, C. (1996). Tests of encoding tradeoffs between item and associative information. *Memory & Cognition*, *24*, 202-216.
- Hunt, R. R., & Einstein, G. O. (1981). Relational and item- specific information in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 497–514.
- Hunt, R. R., & Catherine, E. S. (1984). Category Size Effects in Recall: The Roles of Relational and Individual Item Information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *10* (3), 454-464.
- Hasher, L., Lustig, C., & Zacks, R. T. (2007). Inhibitory mechanisms and the control of attention. In A. Conway, C. Jarrold, M. Kane, A. Miyake, & J. Towse (Eds.), *Variation in working memory* (pp. 227–249). New York: Oxford University Press.
- Hunt, R. R. (2012). Distinctive processing: The coaction of similarity and difference in memory. In B.



H. Ross (Ed.), *Learning and Motivation*, v. 52, pp. 1-46. New York: Academic Press

Hahm, 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, 305–308.

Hayes, S.M., Ryan, L., Schnyer, D., & Nadel, L. (2004). An fMRI Study of Episodic Memory: Retrieval of Object, Spatial, and Temporal Information. *Behavioral Neuroscience*, 118, 885-896.

Hunt, R. R. (2006). The meaning of distinctiveness in memory research. In R. R. Hunt and J. B. Worthen (Eds.), *Distinctiveness and memory*. New York: Oxford University Press.

Hunt, R.R., & Smith, R.E. (1996). Accessing the particular from the general: The power of distinctiveness in the context of organization. *Memory and Cognition*, 24, 217-225

Heathcote, A., Raymond, F., & Dunn, J. (2006). Recollection and familiarity in recognition memory: Evidence from ROC curves. *Journal of Memory and Language*, 55, 495-514.

---

## I

Isarida, T., & Isarida, T.K. (2004). Effects of environmental context manipulated by the combination of place and task on free recall. *Memory*, 12 (3), 376-384.

Israel, L., & Schacter, D. L. (1997). Pictorial encoding reduces false recognition of semantic associates. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 577–581.

---

## J

Johnson, M.K., Hashtroudi, S., & Lindsay, D.S. (1993). Source monitoring. *Psychological Bulletin*, 114 (1), 3-28.

James, K. H., Humphrey, G. K., & Goodale, M. A. (2001). Manipulating and recognizing virtual objects: Where the action is. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 55, 111–120.

James, K. H., Humphrey, G. K., Vilis, T., Corrie, B., Baddour, R., & Goodale, M. A. (2002). “Active” and “passive” learning of three-dimensional object structure within an immersive virtual reality environment. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34, 383–390.

Jobe, J.B. (2003). Cognitive psychology and self-reports: models and methods. *Quality of Life Search*, 12, 219-227.

Jacobs D.M., Rakitin, B.C., Zubin, N.R., Ventura, P.R., & Stern, Y. (2001) Cognitive correlates of mnemonics usage and verbal recall memory in old age. *Neuropsychiatry, Neuropsychology, and Behavioral Neurology* 4, 15-22.

- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*, 2 vols. (1890) Dover Publications, 1950.
- Jäger, T., Mecklinger, A., & Kipp, K.H. (2006). Intra- and inter-item associations doubly dissociate the electrophysiological correlates of recollection and familiarity, *Neuron*, 52, 535-545.
- Janzen, G., & van Turenout, M. (2004). Selective neural representation of objects relevant for navigation. *Nature Neuroscience*, 7, 673-677.
- Johnson, M.K., De Leonardis, D.M., Hashtroudi, S., & Ferguson, S. A. (1995). Aging and single versus multiple cues in source monitoring. *Psychology and Aging*, 10, 507-517.
- Jung, J. & Skeebo, S. (1967). Multitrial free recall as a function of constant versus varied input orders and list length. *Canadian Journal of Psychology*, 21, 196-203.
- Jacobsen, C.F., & Nissen, H.W. (1937). Studies of cerebral function in primates. IV. The effects of frontal lobe lesions on the delayed alternation habit in monkeys. *Journal of Comparative Physiology and Psychology*, 23, 101-112.
- Jacobs, W. J., Thomas, K. G. F., Laurance, H. E., & Nadel, L. (1998). Place learning in virtual space II: Stimulus control. *Learning and Motivation*, 29, 288-308.
- Jacoby, L.L. (1991) A process dissociation framework—separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of Memory and Language*, 30, 513–541.
- Josman, N., Schneiderman, A. E., Klinger, E., & Shevil, E. (2009). Using virtual reality to evaluate executive functioning among persons with schizophrenia: A validity study. *Schizophrenia Research*, 115 (2-3), 270-277.
- Jacoby, L.L. & Bartz, W.H. (1972). Encoding processes and the negative recency effect. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11, 561-565.
- Jeong, M., Tashiro, M., Singh, L., Yamaguchi, K., Horikawa, E., Miyake, M.,..., & Itoh, M. (2006). Functional brain mapping of actual car driving using [18F] FDG-PET. *Annals of Nuclear Medicine*, 20 (9), 623-628.
- Jacobs, M.L., & Donders, J. (2007). Performance discrepancies on the California Verbal Learning Test-second edition (CVLT-II) after traumatic brain injury. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 23 (1), 113-118.
- Jacoby, L. L. (1973). Test appropriate strategies in retention of categorized lists. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 675–682.
- Jacoby, L.L. & Dallas, M. (1981). On the relationship between autobiographical and perceptual learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 110, 306-340.
- Janowski, J., Shimamura, A.P., & Squire, L.R.(1989). Memory and metamemory: Comparisons

between patients with frontal lobe lesions and amnestics. *Psychobiology*, 17, 3–11.

Jenkins, J.B., & Dallenbach, K.M. (1924). Oblivescence during sleep and waking. *American Journal of Psychology*, 35, 605–12

## K

---

Kahana, M. J. and Wingfield, A. (2000). A functional relation between learning and organization in free recall. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 516-521.

Kahn, I., Davachi, L., & Wagner, A. (2004). Functional-neuroanatomic correlates of recollection: Implications for models of recognition memory. *The Journal of Neuroscience*, 24(17), 4172– 4180.

Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 637-671.

Kapur N., & Brooks, D.J. (1999). Temporally-specific retrograde amnesia in two cases of discrete bilateral hippocampal pathology. *Hippocampus* 9, 1-8.

Kapur S, Craik FI, Tulving E, Wilson AA, Houle S, Brown GM. (1994). Neuroanatomical correlates of encoding in episodic memory: levels of processing effect. *Proceedings of the National Academy of Science, U S A*, 91(6), 2008-2011.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203–220.

Kessels, R.P.C., Hobbel, D., & Postma, A. (2007). Aging, context memory and binding: A comparison of "what, where and when" in young and older adults. *International Journal of Neuroscience*, 117, 795-810.

Kim, J., Basak, J.M., & Holtzman, D.M. (2009) The role of apolipoprotein E in Alzheimer's disease. *Neuron*, 63(3), 287-303.

King, J.A., Burgess, N., Hartley, T., Vargha-Khadem, F., & O'Keefe, J. (2002). The human hippocampus and viewpoint dependence in spatial memory. *Hippocampus*, 12, 811–820

King, J.A., Hartley, T., Spiers, H.J., Maguire, E.A., & Burgess N. (2005). Anterior prefrontal involvement in episodic retrieval reflects contextual interference. *Neuroimage*, 28, 256–267

Kinsella, K., & He, W. (2009). *An Aging World: 2008*. Washington, DC: National Institute on Aging and U.S. Census Bureau.

- Kintsch, W. (1968). Recognition and free recall of organized lists. *Journal of Experimental Psychology*, 78 (3, Pt.1), 481-487
- Kintsch, W. (1970). *Learning, memory and conceptual processes*. N.Y.: Wiley.
- Kirshner, S., Weiss, P.L. & Tirosh, E. (2011). Meal-Maker: A Virtual Meal Preparation Environment for Children with Cerebral Palsy. *European Journal of Special Needs Education*, 26(3), 323-336.
- Kirwan CB, & Stark CE. (2004). Medial temporal lobe activation during encoding and retrieval of novel face-name pairs. *Hippocampus*, 14, 919–930.
- Kishiyama MM, Yonelinas AP, Knight RT. (2009). Novelty enhancements in memory are dependent on lateral prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 29, 8114–8118.
- Kliegel, M., Eschen, A., & Thöne-Otto, A.I.T. (2004). Planning and realization of complex intentions in traumatic brain injury and normal aging. *Brain and Cognition*, 56, 43-54.
- Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., & Marié, R.M. (2006) Virtual action in Parkinson's disease: a control study. *Cyberpsychology and Behavior*, 9(3), 342–347.
- Knof, M. (1991). Having shaved a kiwi fruit: Memory of unfamiliar subject-performed actions. *Psychological Research*, 53, 203-211.
- Koriat, A., Ben-Zur, H., & Druch, A. (1991). The contextualization of memory for input and output events. *Psychological Research*, 53, 260-270.
- Kormi-Nouri, R. (1995). The nature of memory for action events: An episodic integration view. *European Journal of Cognitive Psychology*, 7, 337-363.
- Korsakoff, S. (1889). Étude médico-psychologique sur une forme des maladies de la mémoire. *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger*, 28, 501-530.
- Köster, E.P., Degel, J., & Piper D. (2002) Proactive and retroactive interference in implicit odor memory. *Chemical Senses*, 27, 191–207.
- Koutstaal, W., & Schacter, D. L. (1997). Gist-based false recognition of pictures in older and younger adults. *Journal of Memory and Language*, 37, 555–583.
- Koutstaal, W., Schacter, D. L., Galluccio, L., & Stofer, K. A. (1999). Reducing gist-based false recognition in older adults: Encoding and retrieval manipulations. *Psychology and Aging*, 14, 220–237.
- Kramer, J., Rosen, H.J., Du, A-T., Schuff, N., Hollnagel, C., Weiner, M.W.,..., & Delis, D. (2005). Dissociations of hippocampal and frontal contributions to episodic memory performance. *Neuropsychology*, 19 (6), 799-805.
- Kravitz, D.J., Saleem K.S., Baker, C.I., & Mishkin, M. (2011) A new neural framework for visuospatial

processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 12, 217-230,

Kuhl B. A., & Wagner, A. D. (2009) Strategic Control of Memory. In: Squire LR (ed.) *Encyclopedia of Neuroscience*, volume 9 (pp. 437-444). Oxford: Academic Press.

Kurby, C.A. & Zacks, J.M. (2011). Age differences in the perception of hierarchical structure in events. *Memory & Cognition*, 39, 75–91.

## L

---

Lezak, M.D., Howieson, D.B., & Loring, (2004). *Neuropsychological Assessment (4th Ed.)* New York: Oxford University Press.

Light, L. L. (1992). The organization of memory in old age. In F. I. M. Craik & T. Salthouse (Eds.), *Handbook of aging and cognition* (pp. 111-165). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Livingstone, S.A. & Skelton, R.W. (2007) Virtual environment navigation tasks and the assessment of cognitive deficits in individuals with brain injury. *Behavioural Brain Research*, 185, 21–31.

Long, N.M., Öztekin, I., & Badre, D. (2010). Separable Prefrontal Cortex Contributions to Free Recall. *The Journal of Neuroscience*, 30(33), 10967-10976

Luce, R.D. (1963). A threshold theory for simple detection experiments. *Psychological Review*, 70, (1), 61-79.

Lott, I.T., & Dierssen, M. (2010). Cognitive deficits and associated neurological complications in individuals with Down's syndrome. *The Lancet Neurology*, 9 (6), 623-633.

Lee, J.H., Ku, J., Cho, W., Hahn, W.Y., Kim, I.Y., Lee, K., ..., & Kim, S.I. (2003). A Virtual Reality System for the Assessment and Rehabilitation of the Activities of Daily Living *CyberPsychology & Behavior*. August 2003, 6(4), 383-388.

Lo Priore, C., Castelnova, G., Liccione, D., & Liccione, D., (2003). Experience with V-STORE: Considerations on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *CyberPsychology & Behavior*, 6(3), 281–287.

Levine, B., Stuss, D.T., & Milberg, W.P. (1997). Effects of aging on conditional associative learning: process analyses and comparison with focal frontal lesions. *Neuropsychology*, 11 (3), 367-381.

Long, N.M., Öztekin, I., and Badre, D. (2010). Separable prefrontal cortex contributions to free recall. *Journal of Neuroscience*, 30(33), 10967-10976

Luria, A. R. (1980). *Higher cortical functions in man (2nd ed.)*. New York: Basic Books. (Original work published 1966.)

- Libby, L.A., Yonelinas, A.P., Ranganath, C., Ragland, J.D. (2013). Recollection and familiarity in schizophrenia: a quantitative review. *Biological Psychiatry*, 73, 944–950.
- Liu, L., Miyazaki M., & Watson, B.A.. (1999). Norms and validity of the “DriVR” – a virtual reality driving assessment for persons with head injury. *Cyberpsychology & Behavior*, 2 (1), 53-67.
- Liu L, Watson B, Miyazaki M. (1999) VR for the elderly: quantitative and qualitative differences in performance with a driving simulator. *Cyberpsychology and Behavior*, 2(6), 567–76.
- Loftus, E.F. (1975). Leading questions and the eyewitness report. *Cognitive Psychology*, 7, 560–572.
- Loftus, E.F., Miller, D.G., & Burns, H.J. (1978). Semantic integration of verbal information into a visual memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4, 19–31.
- Loftus, E.F.; Hoffman, H.G. (1989). Misinformation and memory: The creation of memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 100–104.
- Loftus, E.F. & Ketcham, K. (1994) *The Myth of Repressed Memory*. NY: St. Martin's Press.
- Larrue, F., Sauzéon, H., Foloppe, D., Wallet, G., Cazalets, J-R., Gross, C.,..., & N’Kaoua, B. (2013). Assessing the impact of automatic versus controlled rotations on spatial transfer with a joystick and a walking interface in VR. *Lectures Notes in Computer Science*, 8117 (1), 1-18.
- Lee, T., Crawford, J.D., Henry, J.D., Trollor, J.N., Kochan, N.A., Wright, M.J.,..., & Sachdev, P.S. (2012). Mediating effects of processing speed and executive functions in age-related differences in episodic memory performance: a cross-validation study. *Neuropsychology*, 26 (6), 776-784.
- Lindsay, D. S. (2008). Source monitoring and eyewitness memory. In B. L. Cutler (Ed.), *Encyclopedia of psychology and law* (pp. 748-750). Thousand Oaks, CA: Sage
- Levy-Gigi, E., & Vakil, E. (2012). The dual effect of context on memory of related and unrelated themes: Discrimination at encoding and cue at retrieval. *Memory*, 7, 728-741
- Levine, B., Cabeza, R., McIntosh, A.R., Black, S.E., Grady, C.L., & Stuss, D.T. (2002). Functional Reorganization of Memory after Traumatic Brain Injury: A Study with H2O Positron Emission Tomography. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 73, 173-181.
- Lejeune, J., Turpin, R., & Gautier, M. (1959) Le mongolisme, maladie chromosomique. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 143, 256–265.
- Lamar, M., Resnick, S.M., & Zonderman, A.B. (2003). Longitudinal changes in verbal memory in older adults: Distinguishing the effects of age from repeat testing. *Neurology*, 60, 82-86.
- Lepage, M., Ghaffar, O., Nyberg, L., & Tulving, E. (2000). Prefrontal cortex and episodic memory retrieval mode. *Proceeding of the National Academy of Science, U S A*, 97, 506 –511.

## M

---

Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2005). *Detection theory: A user's guide (2nd ed.)*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

Magnussen, S., & Helstrup, T. (eds.) (2007). *Everyday memory*. Hove: Psychology Press.

Mandler, G. (1980). Recognizing: The judgment of previous occurrence. *Psychological Review*, *87*(3), 252-271.

Mangels, J. A., & Heinberg, A. (2006). Improved episodic integration through enactment: implications for aging. *Journal of General Psychology*, *133*, 37-65.

Manning, J.R., Sperling, M.R., Sharan, A., Rosenberg, E.A., & Kahana, M.J. (2012). Spontaneously reactivated patterns in frontal and temporal lobe predict semantic clustering during memory. *The Journal of Neuroscience*, *32*(26), 8871-8878.

Markowitsch, H. J. (1997). The functional neuroanatomy of episodic memory retrieval. *Trends in Neurosciences*, *20*, 557-558.

Marsh, R. L., Landau, J. D., & Hicks, J. L. (1996). The post-information effect and reductions in retroactive interference. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 1296-1303.

Martin, S.J., & Clark, R.E. (2007). The rodent hippocampus and spatial memory: from synapses to systems. *Cellular and molecular life science*, *64* (4), 401-431.

Mather, M., Henkel, L.A., & Johnson, M.K. (1997). Evaluating characteristics of false memories: Remember/Know judgments and memory characteristics questionnaire compared. *Memory & Cognition*, *25*, 826-837.

Mather, M., Henkel, L.A., & Johnson, M.K. (1997). Evaluating characteristics of false memories: Remember/Know judgments and memory characteristics questionnaire compared. *Memory & Cognition*, *25*, 826-837.

May, R. B., & Sande, G. N. (1982). Encoding expectancies and word frequency in recall and recognition. *American Journal of Psychology*, *95*, 485-495.

May,C.P., Hasher, L., & Kane, M.J. (1999). The role of interference in memory span. *Memory & Cognition*, *27*, 759–767

Mayes, A.R., Holdstock, J.S., Isaac, C.L., Montaldi, D., Grigor, J., Gummer, A.,..., & Norman, K.A. (2004). Associative ecognition in a patient with selective hippocampal lesions and relatively normal item recognition. *Hippocampus* *14*, 763–784.

- Mayes, A. R., Holdstock, J. S., Isaac, C. L., Hunkin, N. M., & Roberts, N. (2002). Relative sparing of item recognition memory in a patient with adult-onset damage limited to the hippocampus. *Hippocampus, 12*(3), 325–340.
- Mayes, A., Montaldi, D., & Migo, E. (2007). Associative memory and the medial temporal lobes. *Trends in Cognitive Sciences, 11*, 126–135.
- McCabe, D.P., Presmanes, A.G., Robertson, C.L., & Smith, A. (2004). Item-specific processing reduces false memories. *Psychonomic Bulletin & Review, 11* (6), 1074-1079
- McClelland, J. L., McNaughton, B. L., & O'Reilly, R. C. (1995). Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: Insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory. *Psychological Review, 102*, 419–457.
- McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2007). *Prospective memory: An overview and synthesis of an emerging field*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- McDaniel, M. A., DeLosh, E. L., & Merritt, P. S. (2000). Order information and retrieval distinctiveness: The recall of common versus bizarre material. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 26*, 1045-1056.
- McDermott, K. B. (1996). The persistence of false memories in list recall. *Journal of Memory & Language, 35*, 212–230.
- McDowd, J. M., & Craik, F. I. M. (1988). Effects of aging and task difficulty on divided attention performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 14*, 267–280.
- McGee JS, van der Zaag C, Rizzo A, Buckwalter JG, Neumann U, Thiebaut M. (2000). Issues for the assessment of visuospatial skills in older adults using virtual environment technology. *CyberPsychology and Behavior, 3*(3), 469–482.
- Meador, K. J., Loring, D. W., Bowers, D., & Heilman, K. M. (1987). Remote memory and neglect syndrome. *Neurology, 37*, 522–526.
- Mecklinger, A., Weber, K., Gunter, T.C., & Engle, R.W. (2003) Dissociable brain mechanisms for inhibitory control: effects of interference content and working memory capacity. *Cognitive Brain Research, 18*, 26-38.
- Medina, K.L., Shear, P.K., & Schafer, J. (2006). Memory functioning in polysubstance dependent women. *Drug and Alcohol Dependence, 84*(3), 248-255.
- Meeuwissen, E. B., Takashima, A., Fernández, G., & Jensen, O. (2011), Increase in posterior alpha activity during rehearsal predicts successful long-term memory formation of word sequences. *Human Brain Mapping, 32*, 2045–2053.
- Metcalf, J. & Murdock, B.B., Jr. (1981). An encoding and retrieval model of single-trial free recall.



*Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20, 161-189

Metcalf, J., & Murdock, B.B. (1981). An encoding and retrieval model of single-trial free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20, 161-189.

Migo, E., Montaldi, D., Norman, K.A., Quamme, J., & Mayes, A. (2009). The contribution of familiarity to recognition memory is a function of test format when using similar foils. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(6), 1198–1215.

Migo, E.M., Mayes, A.R., & Montaldi, D. (2012). Measuring recollection and familiarity: Improving the remember/know procedure. *Consciousness and Cognition*, 21, 1435–1455.

Milner, A. D. & Goodale, M.A. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford: Oxford University Press.

Mitchell, D. B., Hunt, R. R., & Schmitt, F. A. (1986). The generation effect and reality monitoring: Evidence from dementia and normal aging. *Journal of Gerontology*, 41(1), 79–84.

Mitchell, K.J., Johnson, M.K., & Mather, M. (2003). Source monitoring and suggestibility to misinformation: Adult age-related differences. *Applied Cognitive Psychology*, 17, 107-119.

Mitchell, J.P., Sullivan, A.L., Schacter, D.L., & Budson, A.E. (2006). Misattribution errors in Alzheimer's disease: The illusory truth effect. *Neuropsychology*, 20, 185-92.

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

Moffat, S.D., & Resnick, S.M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral Neuroscience*, 116, 851–859.

Moritz, S., & Woodward, S. (2006). Metacognitive control over false memories: A key determinant of Delusional thinking. *Current Psychiatry Reports*, 8, 184-190.

Morris, R.G.M. (1981). Spatial localization does not require the presence of local cues. *Learning and Motivation*, 2 (2), 239–260.

Moscovitch M., Nadel, L., Winocur, G., Gilboa, A., & Rosenbaum, R.S. (2006). The cognitive neuroscience of remote episodic, semantic and spatial memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 16, 179 - 190.

Moscovitch, M. (1992). Memory and working with memory: A component process model based on modules and central systems. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 257-267.

Mulhall EF. 1915. Experimental studies in recall and recognition. *American Journal of Psychology*, 26 (2), 217 228.

Müller, G.E., & Pilzecker, A. (1900). Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis [Experimental contributions to the science of memory]. *Zeitschrift für Psychologie: Ergänzungsband*, 1, 1–300

- Mulligan, N. W. (1999). The effects of perceptual interference at encoding on organization and order: Investigating the roles of interspecific and relational information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *25*, 54-69.
- Mulligan, N. W., & Lozito, J. P. (2004). Self-generation and memory. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 45, pp. 175-214). San Diego: Elsevier.
- Mulligan, N. W., & Peterson, D. (2008). Assessing a retrieval account of the generation and perceptual-interference effects. *Memory & Cognition*, *36*, 1371-1382.
- Murdock, B. B. (1965). Signal detection theory and short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, *70*, 443-447.
- Murray, E.A., & Richmond, B.J. (2001). Role of perirhinal cortex in object perception, memory, and associations. *Current Opinion in Neurobiology*, *11*, 118-193.
- Murray, L.J. & Ranganath, C. (2007). Dorsolateral prefrontal cortex contributes to successful relational memory encoding. *Journal of Neuroscience*, *27*(20), 5515-22.

## N

---

- Nadel, L., Samsonovich, A., Ryan, L., & Moscovitch, M. (2000). Multiple trace theory of human memory: Computational, neuroimaging, and neuropsychological results. *Hippocampus*, *10*, 352-368.
- Naveh-Benjamin, M. (2000). Adult-age differences in memory performance: Tests of an associative deficit hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *26*, 1170-1187.
- Naveh-Benjamin, M., Hussain, Z., Guez, J., & Bar-On, M. (2003). Adult-age differences in memory performance: Further support for an associative deficit hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *29*, 826-837.
- Naveh-Benjamin, M., Shing, Y. L., Kilb, A., Werkle-Bergner, M., Lindenberger, U., & Li, S.-C. (2009). Adult age differences in memory for name-face associations: The effects of intentional and incidental learning. *Memory*, *17*, 220-232.
- Neisser, U. (1978). Memory: What are the important questions? In M. M. Gruneberg, E E. Morris, & R. N. Sykes (Eds.), *Practical aspects of memory* (pp. 3-24). San Diego, CA: Academic Press.
- Nelson, J.K., Reuter-Lorenz, P.A., Sylvester, C-Y.C., Jonides, J., & Smith, E.E. (2003) Dissociable neural mechanisms underlying response-based and familiarity-based conflict in working memory. *Proceedings of the National Academy of Science, U S A*, *100*,11171–11175.

- Nelson, D.L. and Davis, M. (1972). Transfer and false recognitions based on phonetic identities of words. *Journal of Experimental Psychology*, 92, 347-353.
- Nichols, S.J., Jones, W., Roman, M.J., Wulfeck, B., Delis, D., Reilly, J. & Bellugi, U. (2004) Mechanisms of verbal memory impairment in four neurodevelopmental disorders. *Brain & Language, Special issue: Language in atypical children*. 88(2), 180-189.
- Nilsson, L.-G., & Craik, F. I. M. (1990). Additive and interactive effects in memory for subject-performed tasks. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2, 305-324.
- Nordin, S., & Murphy, C. (1998). Odor memory in normal aging and Alzheimer's disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 855, 686-693.
- Numan, B., Sweet, J. J., & Ranganath, C. (2000). Use of the California Verbal Learning Test to detect proactive interference in the traumatically brain injured. *Journal of Clinical Psychology*, 56, 553-562.
- Nyberg L, Petersson KM, Nilsson L-G, Sandblom J, Åberg C, and Ingvar M. (2001). Reactivation of motor brain areas during explicit memory for actions. *Neuroimage* 14, 521-528.
- Nyberg L. (2002). Levels of processing: a view from functional brain imaging. *Memory*. 10(5-6), 345-8.
- Nyberg, L., Nilsson, L. G., & Backmann, L. (1991). A component analysis of action events. *Psychological Research*, 53, 219-225.
- Nyberg, L., Tulving, E., Habib, R., Nilsson, L.-R., Kapur, S., Houle, S., Cabeza, R., and McIntosh, A. R. 1995. Functional brain maps of retrieval mode and recovery of episodic information. *NeuroReport*, 7, 249-252.

## O

---

- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Oxford University Press.
- O'Keefe, J., & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Research*, 34 (1), 171-175.
- Oken, B. S., Kishiyama, S. S., & Kaye, J. A. (1994). Age-related differences in visual search task performance: Relative stability of parallel but not serial search. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 7, 163-168.
- Old, S. & Naveh-Benjamin, M. (2008). Differential Effects of Age on Item and Associative Measures of Memory: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 23, 104-118.
- Otten, L. J., Henson, R. N., & Rugg, M. D. (2001). Depth of processing effects on neural correlates of

memory encoding: Relationship between findings from across- and within-task comparisons. *Brain*, 124, 399-412.

Ozen, L.J., Skinner, E.I., & Fernandes, M.A. (2010). Rejecting familiar distracters during recognition in young adults with traumatic brain injury and in healthy older adults. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 16, 556-565.

## P

---

Paivio, A., Rogers, T.B. & Smythe, P. C. (1968). Why are pictures easier to recall than words? *Psychonomic Science*, 11, 1-2.

Parasuraman, R. (1998). *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press.

Parasuraman, R., Nestor, P.G., & Greenwood, P. (1989). Sustained attention capacity in young and older adults. *Psychology and Aging*, 4(3), 339-345.

Park, H., & Rugg, M.D. (2011). Neural correlates of encoding within- and across-domain inter-item associations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 2533-43

Parkin, A. J., & Walter, B. (1992). Recollective experi- perceptual quality. *Journal of Memory and Lanence*, normal aging, and frontal dysfunction. *Psychology and Aging*, 7, 290-298.

Pashler, H., & Johnston J.C. (1998). Attentional limitations in duall tasks performance. In H. Pashler, *Attention* (pp. 155-189). Hove: Psychology Press.

Penke, L. & Deary, I. J. (2010). Some guidelines for structural equation modelling in cognitive neuroscience: The case of Charlton et al.'s study on white matter integrity and cognitive ageing. *Neurobiology of Aging*, 31, 1656-1660

Perry, R. J., & Hodges, J. R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: A critical review. *Brain*, 122, 383-404.

Péruch, P., Vercher, J.L., & Gauthier, G.M. (1995) Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, 7(1), 1-20

Péruch, P., & Wilson, P. (2004) Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, 5, 218-227.

Peterson, D. J., & Mulligan, N. W. (2010). Enactment and retrieval. *Memory & Cognition*, 38, 233-243.

Petrides, M., & Pandya, D.N. (1994) Comparative architectonic analysis of the human and the macaque frontal cortex. In F. Boller, J. Grafman, (eds) *Handbook of neuropsychology*, Vol 9 (pp 17-58.), Amsterdam: Elsevier.

- Pierce, B.H., Sullivan, A.L., Schacter, D.L., & Budson, A.E. (2005). Comparing source-based and gist-based false recognition in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, *19* (4), 411-419.
- Plancher G, Nicolas S., & Piolino P., (2008). Contribution of virtual reality for neuropsychology of memory : study in ageing, *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*, *50* (5), 592-602.
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: a virtual reality study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66* (5), 895-909.
- Plancher, G., Guyard, A., Nicolas, S., & Piolino, P. (2009). Mechanisms underlying the production of false memories for famous people's names in aging and Alzheimer's disease *Neuropsychologia*, *47*, 2527-2536.
- Pointer S.C., & Bond N.W. (1998) Context-dependent memory: Colour versus odor. *Chemical Senses* *23*, 359–362.
- Poitrenaud, J., Deweer, B., Kalafat, M., & Van der Linden, M. (2007) *Adaptation en langue française du California Verbal Learning Test (French version of the California Verbal Learning Test)*, Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée, Paris, France.
- Pollak, Y., Shomaly, H.B., Weiss, P.L., Rizzo, A., & Gross-Tsur, V. (2010). Methylphenidate effect in children with ADHD can be measured by an ecological valid continuous performance test embedded in virtual reality. *CNS spectrum*, *15* (2), 125-130.
- Polyn, S.M., Norman, K.A., & Kahana, M.J. (2009). A context maintenance and retrieval model of organizational processes in free recall. *Psychological Review*, *116*(1), 129-156.
- Porter, G., Tales, A., Troscianko, T., Wilcock, G., Haworth, J., & Leonards, U. (2010a). New insights into feature and conjunction search: I. Evidence from pupil size, eye movements and ageing. *Cortex*, *46* (5), 621-636.
- Porter, G., Leonards, U., Wilcock, G., Haworth, J., Troscianko, T., & Tales, A. (2010b). New insights into feature and conjunction search: II. Evidence from Alzheimer's disease. *Cortex*, *46* (5), 637-649.
- Porteus, S. D. (1950). *The Porteus Maze Test and intelligence*. Palo Alto, CA: Pacific Books.
- Posner, M.I., & Petersen, S.E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, *13*, 25– 42.

## Q

---

Quoidbach, J., Hansenne, M., & Mottet, C. (2008). Personality and mental time travel: A differential approach to auto-noetic consciousness. *Consciousness & Cognition, 17*, 1082-1092.

## R

---

Rugg, M.D., & Wilding, E.L. (2000). Retrieval processing and episodic memory. *Trends in Cognitive Science, 4* (3), 108-115

Parsons, T.D., Bowerly, T., Buckwalter & Rizzo, A. (2007). A controlled clinical comparison of attention performance in children with ADHD in a virtual reality classroom compared to standard neuropsychological methods. *Child Neuropsychology, 13*, 363-381.

Rabbitt, P. (1997). Methodologies and models in the study of executive function. In P. Rabbitt (Ed.), *Methodology of frontal and executive function* (pp. 1-38). East Sussex, UK: Psychology Press Publishers.

Rabin, L. A., Barr, W. B., & Burton, L. A. (2005). Assessment practices of clinical neuropsychologists in the United States and Canada: A survey of INS, NAN, and APA division 40 members. *Archives of Clinical Neuropsychology, 20*, 33-65.

Rabin, L.A., Wang, C., Katz, M.J., Derby, C.A., Buschke, H., & Lipton, R.B. (2012). Predicting Alzheimer's disease: neuropsychological tests, self-reports, informant reports of cognitive difficulties. *Journal of the American Geriatric Society, 60* (6), 1128-1134.

Ragland, J.D, Ranganath, C., & Barch, D.M. (2011). Relational and item-specific encoding: task development and psychometric characteristics. *Schizophrenia Bulletin, 38*, 114-124.

Ranganath, C., Johnson, M.K., & D'Esposito, M. (2000) Left anterior prefrontal activation increases with demands to recall specific perceptual information. *Journal of Neuroscience, 20*, 1-5.

Ranganath, C. (2010). A unified framework for the functional organization of the medial temporal lobes and the phenomenology of episodic memory. *Hippocampus, 20* (11), 1263-1290.

Ranganath, C., Johnson, M. K., & D'Esposito, M. (2003). Prefrontal activity associated with working memory and episodic long-term memory. *Neuropsychologia, 41*(3), 378-389.

Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K., Kennedy, K.M., Head, D., Williamson, A., ..., & Acker, J.D. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cerebral Cortex, 15* (11), 1676-1689.

- Reed, J.M., & Squire, L.R. (1997). Impaired recognition memory in patients with lesions limited to the hippocampal formation. *Behavioural Neuroscience*, 111 (4), 667-675.
- Regan, E., & Price, K.R. (1994). The frequency of occurrence and severity of side-effects of immersion virtual reality. *Aviation Space Environment and Medicine*, 65, 527-30.
- Reid, L. M., & McLullich, A. M. (2006). Subjective memory complaints and cognitive impairment in older people. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 22, 471-485.
- Reitan R.M. (1992). *The trail making test: Manual for administration and scoring*. Tucson: Neuropsychology Laboratory.
- Rey, A.(1964). *L'examen Clinique en psychologie*. Paris : Press Universitaire de France.
- Ribot, T. (1881). *Les maladies de la memoire*. Paris: Germer Bailliere.
- Richardson-Klavehn, A. (2010). Prestimulus neural oscillations and their haemodynamic correlates elucidate the cognitive and neural processes of memory formation. *Clinical Neurophysiology*, 41, 137-146.
- Rizzo, A.A., Buckwalter, J.G., Bowerly T., Van Der Zaag, C., Humphrey, L., Neumann, U.,..., & Sisemore, D. (2000). The Virtual Classroom: A virtual reality environment for the assessment and rehabilitation of attention deficits. *Cyberpsychology & Behavior*, 3(3), 483-499.
- 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), 207-239.
- Robertson, I. H., Ward, A., Ridgeway, V., & Nimmo-Smith, I. (1996). The structure of normal human attention: The Test of Everyday Attention. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 2, 523-534.
- Roediger, H. L., Watson, J. M., McDermott, K. B., & Gallo, D. A. (2001). Factors that determine false recall: A multiple regression analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 385-407.
- Roediger, H.L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented in lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 24(4), 803-814.
- Roenker, D.L., Thompson, C.P., & Brown, S.C. (1971). Comparison of measures for the estimation of clustering in free recall. *Psychological Bulletin*, 76, 45- 48.
- Rolls, E.T., Stringer, S.M., & Trappenberg, T.P. (2002). A unified model of spatial and episodic memory, *Proceedings of the Royal Society of London, series B*, 269, 1087-1093
- Rönnlund, M., Nyberg, L., Bäckman, L., & Nilsson, L.-G. (2003). Recall of subject-performed tasks, verbal tasks, and cognitive activities across the adult life span: Parallel age-related deficits. *Aging*,

*Neuropsychology, and Cognition, 10*, 182-201.

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), 1–18.

Ruddle, R. A., Volkova, E., & Bühlhoff, H. H. (2011). 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.

Rugg, M.D., Johnson, J.D., Park, H., & Uncapher, M.R. (2008). Encoding-retrieval overlap in human episodic memory: A functional neuroimaging perspective. *Progress in Brain Research, 169*, 339–352.

Rugg, M. D., & Wilding, E. L. (2000). Retrieval processing and episodic memory. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(3), 108-115.

Rugg, M. D., Fletcher, P. C., Allan, K., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. J., & Dolan, R. J. (1998). Neural correlates of memory retrieval during recognition memory and cued recall. *Neuroimage, 8*, 262-273.

Rundus, D., Loftus, G. R., & Atkinson, R. C. (1970), Immediate Free Recall and Three-Week Delayed Recognition, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 9*, 684-688.

Rundus, D. (1971). Analysis of rehearsal processes in free recall. *Journal of Experimental Psychology, 89*, 63-77.

Rundus, D., & Atkinson, R. C. (1970). Rehearsal processes in free recall: A procedure for direct observation. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 9*(1), 99–105.

## S

---

Salthouse, T. A., & Siedlecki, K. L. (2007). An individual differences analysis of false recognition. *American Journal of Psychology, 120*, 429-458.

Salthouse, T.A. (1996). The processing speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review, 103* (3), 403-428.

Salthouse, T.A. (2004). What and when of cognitive aging. *Current directions in psychological science, 13* (4), 140-144.

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*, 566–594.

Sanchez-Vives, M.V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Neuroscience, 6*, 332-339.



- Sandquist, T. F., Rohrbaugh, J. W., Syndulko, K., & Lindsley, D. B. (1980). Electrophysiological signs of levels of processing: Perceptual analysis and recognition memory. *Psychophysiology*, *17*, 568- 576.
- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J.P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain Research Review*, *35* (2), 146-160.
- Sauzéon, H., Claverie, B., & N’Kaoua, B. (2006). Age differences in the organization and acquisition-forgetting processes in a multi-free-recall task. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition*, *18*. Retrieved from [http:// cpl.revues.org/index1012.html](http://cpl.revues.org/index1012.html).
- Sauzéon, H., N’Kaoua, B. & Claverie, B. (2001) Self-generated category cue effect on organizational processing in three different age groups. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain, and Cognition*, *2*, 65-78.
- Schacter, D. L. & Addis, D. R. (2007). The ghosts of past and future. *Nature*, *445*, 27.
- Schacter, D. L. & Dodson, C. S. (2001). Misattribution, false recognition and the sins of memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, *356*, 1385 – 1393.
- Schacter, D. L. (2001). *The seven sins of memory: how the mind forgets and remembers*. Boston, MA; New York, NY: Houghton Mifflin.
- Schacter, D. L., Israel, L., & Racine, C. (1999). Suppressing false recognition in younger and older adults: The distinctiveness heuristic. *Journal of Memory & Language*, *40*, 1–24.
- Schacter, D. L., Koutstaal, W., & Norman, K. A. (1997). False memories and aging. *Trends in Cognitive Sciences*, *1*, 229-236.
- Schacter, D. L., Koutstaal, W., Johnson, M. K., Gross, M. S., & Angell, K. A. (1997). False recollection induced by photographs: A comparison of older and younger adults. *Psychology and Aging*, *12*, 203–215.
- Schacter, D. L., Norman, K. A. & Koutstaal, W. (1998). The cognitive neuroscience of constructive memory. *Annual Review of Psychology*. *49*, 289–318.
- Schacter, D. L., Verfaellie, M., Anes, M. D., & Racine, C. (1998). When true recognition suppresses false recognition: Evidence from amnesic patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 668-679.
- Schaie, K. W. (1996). Intellectual development in adulthood. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging*, 4th ed. (pp. 266-286).Cambridge University Press.
- Schiehser, D.M., Delis, D.C., Filoteo, J.V., Delano-Wood, L., Duke Han, S., Jak, A.J., ...& Bondi, M. (2011). Are self-reported symptoms of executive dysfunction associated with objective performance following mild-to-moderate traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *33* (6), 704-714.

- Schmitter-Edgecombe, M., & Seelye, A.M. (2012). Recovery of content and temporal order memory for performed activities following moderate to severe traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 34 (3), 256-268.
- Schultheis, M.T., & Rizzo, A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46, 3, 296-311.
- Schwind, G., & Black, S. (2009). Functional imaging studies of episodic memory in Alzheimer's disease: A quantitative meta-analysis. *Neuroimage* 45, 181–190.
- Scoville, W.B., & Milner, B. (1957) Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 20, 11-21.
- Semon, R. (1923). *The mneme*. London: George Allen & Unwin, Unwin,
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Shallice, T. and Burgess, P. W. (1991) Higher-order cognitive impairments and frontal lobe lesions in man. In: H. S. Levin, H. M. Eisenberg, and A. L. Benton (Eds.) *Frontal Lobe Function and Dysfunction* (pp. 125-138). New York: Oxford University Press.
- Sharps, M.J., & Gollin, E.S. (1988). Aging and free recall for objects located in space. *Journal of Gerontology*, 43 (1), 8-11.
- Shastri, L. (2002). Episodic memory and cortico-hippocampal interactions. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(4), 162–168.
- Shimamura, A.P., Jurica, P.J., Mangels, J.A., Gershberg, F.B., & Knight, R.T. (1995) Susceptibility to memory interference effects following frontal lobe damage: findings from tests of paired associate learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 144–152.
- 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.
- Skinner, E.I., & Fernandes, M.A. (2007). Neural correlates of recollection and familiarity: A review of neuroimaging and patient data. *Neuropsychologia*, 45, 2163–2179.
- Slater, M. (2003). A Note on Presence Terminology,' *Presence Connect*. Online: available on <http://presence.cs.ucl.ac.uk/presenceconnect/index.html>
- Smith, R. E., Lozito, J. P., & Bayen, U. (2005). Adult age differences in distinctive processing: The modality effect on false recall. *Psychology and Aging*, 20, 486–492.
- Smith, R.E. (2006) Adult age differences in episodic memory: Item-specific, relational, and distinctive

processing. In R.R. Hunt & J. Worthen, *Distinctiveness and memory* (pp. 259–287). New York: Oxford University Press.

Smith, S.M., & Vela, E. (2001). Environmental context-dependent memory: a review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(2), 203-20.

Sorita, E., Larrue, F., Criquillon, J., Simion A., Sauzéon, H., Joseph, P-A., & Mazaux, J.-M. (2012). Do patients with traumatic brain injury learn a route in the same way in real and virtual environments? *Disability and Rehabilitation*, PMID: 23244232 DOI: 10.3109/09638288.2012.738761.

Souchay, C., Isingrini, M., & Espagnet, L. (2000). Aging, episodic memory feeling-of-knowing, and frontal functioning. *Neuropsychology*, 2, 299-309.

Sperling, R.A., Chua, E.F., Cocchiarella, A.J., Rand-Giovannetti, E., Poldrack, R., Schacter, D.L., & Albert, M.S. (2003). Putting names to faces: anterior hippocampal activation predicts successful subsequent memory. *Neuroimage*, 20, 1400-1410.

Spiers, H.J., Burgess, N., Maguire, E.A., Baxendale, S.A., Hartley, T., Thompson, P., & O'Keefe, J. (2001). Unilateral temporal lobectomy patients show lateralised topographical and episodic memory in a virtual town. *Brain*, 124, 2476–2489.

Spooner, D.M. & Pachana, N.A. (2006). Ecological validity in neuropsychological assessment: A case for greater consideration in research with neurologically intact participants. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21, 327-337.

Squire, L.R. (1992). Declarative and nondeclarative memory: Multiple brain systems supporting learning and memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 232-243,

St. Jacques, P.L., Rubin, D.C., & Cabeza, R. (2012). Age-related effects on the neural correlates of autobiographical memory retrieval. *Neurobiology of Aging*, 33(7), 1298-1310.

Staresina, B.P., & Davachi, L. (2006) Differential encoding mechanisms for subsequent associative recognition and free recall. *Journal of Neuroscience*, 26 (9), 162-9172.

Staresina, B.P., & Davachi, L. (2010). Object unitization and associative memory formation are supported by distinct brain regions. *Journal of Neuroscience*, 30 (29), 9890-9897.

Stark, C. E., & Squire, L. R. (2003). Hippocampal damage equally impairs memory for single items and memory for conjunctions. *Hippocampus*, 13(2), 281–292.

Stark, C.E.L., Bayley, P.J., & Squire, L.R. (2002). Recognition memory for single items and for associations is similarly impaired following damage to the hippocampal region. *Learning & Memory*, 9, 238 –242.

Sternberg, R.J. (2009). *Cognitive Psychology* (Fifth ed.). Wadsworth, UK: Cengage Learning.

- Sternberg, R.J., & Tulving, E. (1977). The measurement of subjective organization in free recall. *Psychological Bulletin*, 84, 539-556.
- Stone, M.J. (1973). The effect of prior sleep on rehearsal, recoding and memory. *British Journal of Psychology*, (64), 4, 537-543.
- Strauss, E., Sherman, E.S., & Spreen, O. (2006). *A compendium of Neuropsychological tests*, (3rd Ed.) New York: Oxford University Press.
- Stricker, J.L., Brown, G.G., Wixted, J., Baldo, J.V., & Delis, D.C. (2002). New semantic and serial clustering indices for the California verbal learning test-second edition: background, rationale, & formulae. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 8, 425-435.
- Stuss, D.T., Benson, D.F., 1986. *The Frontal Lobes*. Raven Press, New York.
- Stuss, D.T., Craik, F. I. M., Sayer, L., Franchi, D., & Alexander, M.P. (1996). Comparison of older people and patients with frontal lesions: evidence from word list learning. *Psychology and Aging*, 11, 387-395.
- Sutherland, I.E. (1965). The ultimate display. *Proceedings of IFIP Congress*. pp. 506-508. Retrieved 22 September 2011.
- Swets, J. A. (1961). Is there a sensory threshold? *Science*, 134, 168-177.

## T

---

- Toglia, J. P. (1993), *Contextual Memory Test manual*. Arizona:Therapy Skill Builders.
- Taillade, M., Sauzéon, H., Arvind Pala, P., D jos, M., Larrue, F., Gross, C., & N'Kaoua, B. (2013). Age-related wayfinding differences in real large scale environments : Detrimental motor control effects during spatial learning are mediated by executive decline ? *PloS ONE*, 8(7): e67193. DOI:10.1371/journal.pone.0067193
- Taillade, M., Sauzéon, H., D jos, 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*. *Aging, Neuropsychology, & Cognition*, 1-22, iFirst, DOI: 10.1080/13825585.2012.706247
- Taube, J.S., Muller, R.U., & Ranck, J.B., Jr. (1990) Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *The Journal of Neuroscience* 10, 420-435.
- Thaler, L. & Goodale, M. (2011). Neural substrates of visual spatial coding and visual feedback control for hand movements in allocentric and target-directed tasks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 92.

DOI: 10.3389/fnhum.2011.00092.

Thapar, A. (1996). Reverse-interference effect in free recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, Cognition*, 22, 430-427.

Thapar, A., & McDermott, K. B. (2001). False recall and false recognition induced by presentation of associated words: Effects of retention interval and level of processing. *Memory & Cognition*, 29, 424-432

Thomas, A.K., & Sommers, M.S. (2005). Attention to item-specific processing eliminates age effects in false memories. *Journal of Memory and Language*, 52 (1), 71-86.

Thompson, D. M. (1988). Context and false recognition. In G. Davies D. Thompson (Eds.), *Memory in context: Context in memory* (pp. 285-345). New York: Wiley

Thompson-Schill, S. L., Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E. E., D'Esposito, M., Kan, I. P., et al. (2002). Effects of frontal lobe damage on interference effects in working memory. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 2(2), 109-120.

Thomson, D. M., & Tulving, E. (1970). Associative encoding and retrieval: Weak and strong cues. *Journal of Experimental Psychology*, 86(2), 255-262.

Thorndyke, P., W., & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in Spatial Knowledge Acquired from Maps and Navigation. *Cognitive Psychology*, 14, pp. 560-589.

Tlauka, M., & Wilson, P. N. (1994). The effect of landmarks on route-learning in a computer-simulated environment. *Journal of Environmental Psychology*, 14, 305-313

Tourangeau R. (1984). Cognitive sciences and survey methods. In T.B., Jabine, M.L. Straf, J.M. Tanur, R. Tourangeau (eds), *Cognitive Aspects of Survey Methodology: Building a Bridge between Disciplines* (pp.73-101). Washington, DC: National Academy Press.

Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 1980,12, 97-136.

Troyer, A. K., Winocur, G., Craik, F. I. M., & Moscovitch, M. (1999). Source memory and divided attention: Reciprocal costs to primary and secondary tasks. *Neuropsychology*, 13, 467-474.

Tse, C. S., Balota, D. A., & Roediger, H. L. (2010). The benefits and costs of repeated testing: On the learning of face-name pairs in older adults. *Psychology and Aging*, 25, 833-845

Tulving, E. (1962). The effect of alphabetical subjective organization on memorizing unrelated words. *Canadian Journal of Psychology*, 16, 185-191

Tulving, E. (1968). Organized retention and cued recall. In H.J. Klausmeier and G.T. O'Hearn (Eds.), *Research and Development Toward the Improvement of Education* (pp. 3-13). Madison, WI: Dembar

*Educational Research Services.*

Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving, & W. Donaldson (Eds). *Organization of memory* (pp 381-403). New York: Plenum.

Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. New York: Oxford University Press.

Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology*, 26(1), 1-12.

Tulving, E. (1995). Organization of memory: Quo vadis? In M.S. Gazzaniga (ed.), *The Cognitive Neurosciences* (pp. 839–47). Cambridge, MA: MIT Press

Tulving, E. (2002). From mind to brain. *Annual review of Psychology*, 53, 1-25.

Tulving, E., & Pearlstone, Z. (1966). Availability versus accessibility of information in memory for words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5, 381-391.

Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352-373.

Tulving, E., Kapur, S., Craik, F. I. M., Moscovitch, M., & Houle, S. (1994). Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: Positron emission tomography findings. *Proceedings of the National Academy of Science*, 91, 2016-2020.

Tulving, E., Markowitsch, H.J., Kapur, S., Habib, R., & Houle, S. (1994). Novelty encoding networks in the human brain: Positron emission tomography data. *NeuroReport*, 5, 2525-2528.

Tupper, D.E., & Cicerone, K.D. (1990). *The neuropsychology of everyday life: Assessment and basic competencies*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Turriziani P., Smirni D., Oliveri M., Semenza C., Cipolotti L. (2010). The role of the prefrontal cortex in familiarity and recollection processes during verbal and non-verbal recognition memory: an rTMS study. *Neuroimage* 52, 348–357.

## U

---

Underwood, B. J. (1965). False recognition produced by implicit verbal responses. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 122–129

Underwood, B.J. (1957). Interference and forgetting. *Psychological Review*. 64, 49–60

Unsworth, N., Heitz, R.P., Schrock, J.C., & Engle, R.W. (2005) An automated version of the operation span task. *Behavior Research Methods*, 37, 498-505.

Usoh, M., & Slater, M. (1995). An Exploration of Immersive Virtual Environments. *Endeavour* 19, 1, 34-38

## V

---

- Vaishnavi, S., Calhoun, J., & Chatterjee, A. (2001). Binding personal and peripersonal space: Evidence from tactile extinction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*, 181-189.
- Vakil, E. (2005). The effect of moderate to severe traumatic brain injury on different aspects of memory: a selective review. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *27*, 977-1021.
- Vakil, E., & Tweedy, J.R. (1994). Memory for temporal order and spatial position information: test of the automatic-effortful distinction. *Neuropsychiatry, Neuropsychology, and Behavioral Neurology*, *7*, 281-288.
- Van Damme, I., & d'Ydewalle, G. (2009). Memory loss versus memory distortion: The role of encoding and retrieval deficits in Korsakoff patients' false memories. *Memory*, *17*, 349-366.
- Vanderploeg, R. D., Schinka, J. A., & Retzlaff, P. (1994). Relationships between measures of auditory verbal learning and executive functioning. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *16*, 243-252.
- Vanssay-Maigne, A., Noulhiane, M., Devauchelle, A.D., Rodrigo, S., Baudoin-Chial, S., Meder, J.F.,..., & Chassoux, F. (2011). Modulation of encoding and retrieval by recollection and familiarity: Mapping the medial temporal lobe networks. *NeuroImage*, *58* (4), 1131-1138.
- Vargha-Khadem, F., Gadian, D.G., Watkins, K.E., Connelly, A., Van Paesschen, W., & Mishkin, M. (1997). Differential effects of early hippocampal pathology on episodic and semantic memory. *Science*, *277*, 376-380.
- Vergheze, 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 Geriatric Society*, *50*, 1572-1576.
- Verhaeghen, P., & De Meersman, L. (1998). Aging and the Stroop effect: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, *13*, 120-126.
- Vogel A, Gade A, Stokholm J, Waldemar G. (2005). Semantic memory impairment in the earliest phases of Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders* *19*(2-3), 75-81.
- von Essen, J. D. (2005). Enactment enhances integration between verb and noun, but not relational processing, in episodic memory. *Scandinavian Journal of Psychology*, *46*, 315-321.
- Von Restorff, H. (1933). Über die Wirkung von Bereichsbildungen im Spurenfeld (The effects of field formation in the trace field). *Psychological Research*, *18* (1), 299-342.
- Von Stülpnagel, R., & Steffens, M. (2012). Can active navigation be as good as driving? A comparison

of spatial memory in drivers and backseat drivers. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18 (2), 162-177.

Von Bekeesy, G. (1930). Uber das Fechner'sche Gesetz und seine Bedeutung für die Theorie der akustischen Beobachtungsfehler und die Theorie des Horens. *Annalen der Physik.*, 7, 329-359.

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), 115-1120.

## W

---

Wagner, A. D., Shannon, B. J., Kahn, I., & Buckner, R. L. (2005). Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends in Cognitive Science*, 9, 445-453

Wais, P., Rubens, M.T., Boccanfuso, J., & Gazzaley, A. (2010) Neural mechanisms underlying the impact of visual distraction on long-term memory retrieval. *Journal of Neuroscience*, 30 (25), 8541-8550.

Wallace, W.P. (1970). Consistency of emission order in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9, 58-68.

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, 835-843

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

Wallet, G., Sauzéon, H., Arvind Pala, P., Larrue, F., Zheng, X., & N'Kaoua. (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), 417-423.

Walter, H., Vetter, S.C., Grothe, J., Wunderlich, A.P., Hahn, S., & Spitzer, M. (2001). The neural correlates of driving. *NeuroReport*, 12, 1763-1767.

Ward, G., Woodward, G., Stevens, A., & Stinson, C. (2003). Using overt rehearsals to explain word frequency effects in free recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 29, 186-210.

Ward, L.B. (1937). Reminiscence and rote learning. *Psychological Monographs*, 49 (4), 1-64.

Warrington, E.K., & Weiskrantz, L. (1968). A study of learning and retention in amnesic patients. *Neuropsychologia*, 6 (3), 283-291.



- Warrington, E.K. (1984). Recognition memory test. Windsor: NFER-NELSON.
- Watkins, M.J., LeCompte, D.C., & Kim, K. (2000). Role of study strategy in recall of mixed lists of common and rare words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26 (1), 239-245.
- Waugh, N.C. (1961). Free versus serial recall. *Journal of Experimental Psychology*, 62, 496-502.
- Wechsler, D. (1996). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence' scale-Revised*. New York: Psychological Corporation.
- Wechsler D. (1997). *Wechsler Memory Scale-III*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Wegesin, D.J., Jacobs, D., Zubin, N.R., Ventura, P.R., & Stern, Y. (2000). Source memory and encoding strategy in normal aging. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22, 455-464.
- Welch, G. B., & Burnett, C. T. (1924). Is Primacy a Factor in Association-Formation. *American Journal of Psychology*, 35, 396-401.
- Werner, P., Rabinowitz, S., Klinger, E., Korczyn, A.S., & Josman, N. (2009). The use of the virtual action planning supermarket for the diagnosis of mild cognitive impairment, *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 27, 301-309
- Westerberg, C.E., Paller, K.A., Weintraub, S., Mesulam, M.M., Holdstock, J.S., Mayes, A.R., & Reber, P.J. (2006). When memory does not fail: Familiarity-based recognition in mild cognitive impairment and alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 20(2), 193–205.
- Wheeler, M.A., Stuss, D., & Tulving, E. (1997) Toward a theory of episodic memory: the frontal lobes and autoautographic consciousness. *Psychological Bulletin*, 121, 331–354.
- Whitbourne S. (1998). Physical changes in the aging individual. In: Nordhus IH, Vandenbos GR, Berg S, Fromhol P, editors. *Clinical geropsychology*. Washington-DC: American Psychological Association
- Wickens, D. (1972). Characteristics of word encoding. In A.W., Melton & E. Martin (eds.), *Coding processes in human memory (pp. 191-215)*. Washington, DC: Wiley.
- Wiedmann, C.N., Beinhoff, U., & Riepe, M.W. (2012). Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, 33 (2), 297-303.
- Willis, S.L., 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(5), 569–577.
- Wilson, B.A., Cockburn, J.M., & Baddeley, A.D. (1985). *The Rivermead Behavioural Memory Test*. Thames Valley Test Company, Suffolk, Bury St Edmunds.
- Wilson, P.N. (1999) Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or

memory for objects. *Environment and Behavior*, 31(6), 752-763.

Wilson, P.N., Foreman, N., Gillet, R., & Stanton, D. (1997) Active versus passive processing of spatial information in a computer-simulated environment. *Ecological Psychology*, 9(3), 207-222.

Wilson, P.N., & Peruch, P. (2002) The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desk-top virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, 21, 601-633.

Wixted, J.T., & Ebbesen E. (1991). On the form of forgetting. *Psychological Science*, 2, 409–15

Wixted, J.T. (2004). The psychology and neuroscience of forgetting. *Annual Review of Psychology*, 55, 235-269.

Wixted, J. T. (2007). Dual-process theory and signal-detection theory of recognition memory. *Psychological Review*, 114, 152-176.

Wolbers, T. & Büchel, C. (2005). Dissociable retrosplenial and hippocampal contributions to successful formation of survey representations. *Journal of Neuroscience*, 25(13), 3333-3340.

Woo, E., & Schmitter-Edgecombe, M. (2009). Aging and semantic cueing during learning and retention of verbal episodic information. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 16, 103-119.

Woodward, A. E., Bjork, R. A., & Jongeward, R. H. (1973). Recall and recognition as a function of primary rehearsal. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 608-617.

World Health Organization. (2010). *Global health and aging*. Retrieved from [www.who.int/ageing/publications/global\\_health](http://www.who.int/ageing/publications/global_health).

Wutte, M.G., Glasauer, S., Jahn, K., & Flanagan, V.L. (2012). Moving and being moved: differences in cerebral activation during recollection of whole-body motion. *Behavioral Brain Research*, 227, 21–29.

## Y

---

Yetka, A.A., Pickwell, L.D., & Jenkins, T.C. (1998) Binocular vision: age and symptoms. *Ophthalmology and Physiology of Optics*, 9, 115–120.

Yonelinas, A. P., Dobbins, I., Szymanski, M. D., Dhaliwal, H. S. & King, L. (1997). Signal detection, threshold, and dual-process models of recognition memory: ROCs and conscious recollection. *Consciousness and Cognition*, 5, 418-441.

Yonelinas, A.P. (2002). The nature of recollection and familiarity: A review of 30 years of research. *Journal of Memory and Language*, 46, 441–517.

## Z

---

- Zacks, J. M., & Swallow, K. M. (2007). Event segmentation. *Current Directions in Psychological Science*, *16*, 80-84.
- Zacks, J. M., Speer, N. K., Vettel, J. M., & Jacoby, L. J. (2006). Event understanding and memory in healthy aging and dementia of the Alzheimer type. *Psychology and Aging*, *21*, 466-482.
- Zaromb, F.M., & Roediger, H. L. (2010). The testing effect in free recall is associated with enhanced organizational processes, *Memory & Cognition*, *38* (8), 995-1008
- Zhang, L., Abreu, B.C., Masel, B., Scheibel, R.S., Christiansen, C.H., Huddleston, N., & Ottenbacher, K.J. (2001), Virtual reality in the assessment of selected cognitive function after brain injury, *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *80*, 8, 597-604.
- Zhu, B., Chen, C., Loftus, E.F., Lin, C., He, Q., Chen, C.,..., & Dong, Q.(2010). Individual differences in false memory from misinformation: Cognitive factors. *Memory*, *18*, 543–555.
- Zimmer, H. D. (1991). Memory after motoric encoding in a generation-recognition model. *Psychological Research*, *53*, 226-231.

---

---

# ANNEXES

---

---

# Annexe I

---

## 1. Méthodes d'estimation des paramètres : recollection vs. familiarité

• *La procédure de dissociation des processus (PDP)* est basée sur la considération théorique d'une distinction entre la familiarité et la recollection en termes de processus automatique vs. contrôlé, ou bien encore en termes de inconscient vs. conscient. Cette procédure est également basée sur deux principales considérations : 1) les deux processus sont toujours mobilisés, si l'on considère le fait que des processus mnésiques inconscients (i.e., mémoire implicite) peuvent très bien contribuer aux performances dans les tâches censées évaluer des processus conscients (i.e., mémoire explicite) et vice versa, mais 2) sont indépendants, et propose par conséquent de les séparer sur le plan mathématique. De ce fait, contrairement à la dissociation utilisant plusieurs tâches, ici on dissocie les processus au sein d'une même tâche. Pour cela, deux variantes d'une tâche sont proposées, appelées « tâche d'inclusion » et « tâche d'exclusion ». Pour illustrer ces deux tâches, prenons le cas où les participants étudient une liste de mots soit dans une condition contrôle, soit dans une condition « attention divisée », un design expérimental désormais classique (Jacoby, Toth, & Yonelinas, 1993 ; Schmitter-Edgecombe & Nissley, 2000). Lors de la phase test, ils sont par exemple soumis à une tâche de complétion de mot, une tâche typique de mémoire implicite. Cette tâche d'inclusion est supposée reposer à la fois sur la recollection (R) et la familiarité (F), donc la réponse du participant peut être due à une recollection ou à la familiarité (considérée en tant que processus automatique) ou bien aux deux. De ce fait, on calcule la probabilité de l'inclusion de la manière suivante, en supposant que R et F ne sont pas mutuellement exclusifs :

$$P(\text{inclusion}) = R + F - (R * F), \text{ autrement dit:}$$

$$P(\text{inclusion}) = R + F (1-R), \quad (1)$$

On oppose à cette tâche d'inclusion une tâche d'exclusion dans laquelle les bonnes performances sont supposées ne reposer que sur la familiarité. Contrairement à la tâche d'inclusion, on demande aux participants dans une tâche d'exclusion de se soumettre à une tâche de complétion de mots qui n'ont pas été préalablement présentés pendant la phase d'étude dans la liste. Par conséquent, le sujet complètera les mots en récupérant des mots de

la liste par erreur (comme s'il s'agissait d'intrusions), en ne se basant que sur la familiarité (F) si la recollection est défaillante (1-R) donnant ainsi la probabilité de l'exclusion :

$$P(\text{exclusion}) = F(1-R) \quad (2)$$

La différence des performances obtenues sur la tâche d'inclusion et d'exclusion permet d'estimer la recollection :

$$R = P(\text{inclusion}) - P(\text{exclusion}) \quad (3)$$

Et, à partir de ces équations, on peut finalement isoler la probabilité que le sujet ait fait appel à la familiarité :

$$F = \frac{P(\text{exclusion})}{(1 - R)}$$

On démontre alors que la condition « attention divisée » va diminuer la probabilité de R dans la tâche de complétion de mot pour le test d'inclusion, en revanche la probabilité de F sera augmentée dans la tâche de complétion de mot pour le test d'exclusion, comparé à la tâche contrôle. Ceci revient à dire que diviser l'attention durant l'encodage altère significativement le processus de recollection, le sujet ne se relaye que sur la familiarité par conséquent. Les résultats obtenus dans les diverses études utilisant cette procédure penchent en faveur d'une dissociation entre la recollection et la familiarité, d'autant plus que cette procédure peut également être combinée avec les manipulations à l'encodage : attention divisée, comme on l'a vu, mais aussi la manipulation des niveaux de traitement (Richardson-Klavehn, Gardiner, & Ramponi, 2002 ; Toth, Reingold, & Jacoby, 1994 ; Toth, 1996), la répétition des items (Jacoby, 1999), favoriser le traitement item-spécifique (i.e., distinctivité, Hay & Jacoby, 1999), ou encore la durée d'étude (Hay & Jacoby, 1996). Dans son article désormais classique de 1991, Jacoby appliqua la PDP au paradigme des « 2 listes de mots ». Les participants étudient soit l'une soit l'autre des deux listes et se soumettent à une tâche de reconnaissance de type « Oui/Non » pour laquelle les items de la liste étudiée sont mélangés avec les items de la liste non-étudiée (qui constituent des leurres). L'expérimentateur demande alors aux participants de dire « Oui » aux items qui ont été étudiés et « Non » dans le cas contraire, dans le test d'inclusion, donnant ainsi la possibilité que la réponse « Oui »

sachant qu'il s'agit d'item de la liste 1 dépende de la recollection, de la familiarité ou des deux (voire équation 1). L'instruction d'exclusion demande aux participants au contraire de répondre « Oui » aux items qui n'étaient pas dans la liste cible (c'est-à-dire aux leures), définissant ainsi l'équation 2. Jacoby a ensuite soustrait la proportion de réponses « Oui » données dans la tâche de RI sous instruction d'inclusion de la proportion de réponses « Oui » données sous instruction d'exclusion, définissant l'équation 3, pour isoler la part de recollection. De ce fait, la recollection est définie comme la capacité à inhiber la liste 1. Reprenant le paradigme des « 2 listes » en le modifiant un peu, Gruppuso, Lindsay, & Kelly (1997), ont montré dans leur expérience 1, que la difficulté de la tâche d'encodage des listes (juger la valeur des items en dollars et juger la fréquence d'apparition des items dans la liste) pouvait avoir une incidence sur l'estimation de R et de F. Dans cette expérience, soit les participants encodaient les des deux listes en utilisant la même tâche d'encodage (condition difficile) ou bien deux tâches différentes (une pour chaque liste, condition facile). L'estimation de R était plus importante dans la condition facile comparée à la condition difficile ; à l'inverse, la probabilité de F était plus importante dans la condition difficile comparée à la condition facile et ces résultats ont été répliqués dans leurs expériences 2 et 3 qui manipulaient encore une fois l'attention divisée. Le fait d'étudier la seconde liste permet également d'inférer la manière dont les deux processus interviennent dans la mémoire de la source : l'incapacité à rappeler les items de la liste 1 pour les exclure dans la condition d'exclusion, en ne se basant que sur la familiarité implique une défaillance du contrôle de la source, pour laquelle bien évidemment la recollection est également défaillante.

- *Dans le paradigme « Remember/Know »* ou RK, la procédure est simple. Lors d'une tâche de reconnaissance classique (e.g., de type Oui/Non), dans un premier temps le sujet doit décider si l'item a été « vu » (c'est-à-dire s'il est « ancien »), et dans ce cas répondre « Oui » par exemple, et dans le cas contraire (par exemple un item « nouveau »), répondre « Non ». Pour chacune des types de réponse, le sujet doit ensuite préciser s'il a un souvenir précis de cet item, accompagné de détails et d'éléments contextuels (et dans ce cas le classer comme « Remember ») ou bien s'il sait tout simplement qu'il l'avait déjà « vu » ultérieurement sans pouvoir préciser les détails et les contextes (et de ce fait le classer comme « Know »). Une caractéristique notable de cette procédure est qu'elle ressemble à un auto-questionnaire, dans la mesure où l'on pourrait demander aux sujets s'ils ont pu accéder pour un item donnée à tous les détails contextuels épisodiques, et par conséquent ces deux caractéristiques R et K évaluent en fait un état de conscience particulier associé au souvenir, plutôt que des processus précis (Tulving, 1985). Un corpus assez impressionnant d'études ont opté pour

cette procédure pour évaluer la recollection et la familiarité, en présupposant que la première est évaluée par R tandis que la seconde plutôt par K (Dudukovic & Knowlton, 2006 ; Hudon, Belleville, Gauthier, 2009 ; McCabe, Roediger, McDaniel, & Balota, 2009 ; Khoe et al., 2000 ; McCabe, Geraci, Boman, Sensenig, & Rhodes, 2011 ; Migo, Mayes, & Montaldi, 2012 ; Petrican et al., 2010 ; Mulligan & Picklesimer, 2012 ; Sheridan & Reingold, 2012 ; van Erp et al., 2008). Une idée proposée par Rajaram (1993) était que ces deux modes de récupération que sont le Remembering (R) et le Knowing (K) peuvent être modulés par deux types d'encodage ou de traitement distincts : le traitement conceptuel et le traitement perceptuel. L'influence du traitement conceptuel s'est révélé lorsqu'il a été montré que plus le niveau de traitement à l'encodage était profond, plus le taux de réponse R était important chez les participants (Rajaram, 1996). En revanche, pour le traitement perceptuel le fait de changer la modalité de présentation des items (liste de mots présentée auditivement vs. items présentés en tant qu'image) entre la phase d'étude et la phase test influencerait les réponses « Know » mais pas les réponses « Remember ». Il semblerait donc qu'il y ait une interaction entre le type de traitement et le type d'état de conscience associé à la récupération. Ainsi, Gardiner et al. (2001, exp. 2) ont montré par exemple que le traitement profond (conceptuel) donnait plus de réponse R uniquement si le traitement perceptuel n'était pas manipulé, mais le taux de réponses R baissait malgré le traitement profond si la taille des visages avait changée entre la phase d'étude et la phase test (traitement perceptuel) sans affecter le taux de réponse K. A l'inverse, lorsque le traitement était superficiel, le fait de changer la taille des visages entre la phase d'étude et la phase test ne modifiait pas le niveau de réponses R, mais diminuait significativement le niveau de réponses K.

- Enfin, la *courbe ROC* (Receiver Operating Characteristics), basée sur la TDS, donne une estimation précise des paramètres R et F, et permet de répondre aux prédictions de la théorie duale de la mémoire de reconnaissance quant au comportement de cette courbe. Sur le plan mathématique, une ROC est une fonction qui établit une relation entre la probabilité de reconnaissances correctes et la probabilité de commettre de fausses alarmes (que nous verrons plus en détail dans la section 3 en termes de processus mnésiques). Par conséquent, elle est représentée par les reconnaissances correctes en ordonnée et les fausses alarmes en abscisse. Rappelons que selon Yonelinas (2002), la familiarité obéit à la détection du signal tandis que la recollection obéit à la théorie du seuil. Or, ces deux théories prédisent deux formes de ROC différentes, une ROC curvilinéaire pour la détection du signal et une ROC linéaire pour la théorie du seuil. Selon la TDS, si la force de la trace est un processus évoluant sur un continuum comme la familiarité, alors il faut s'attendre à ce que la fonction



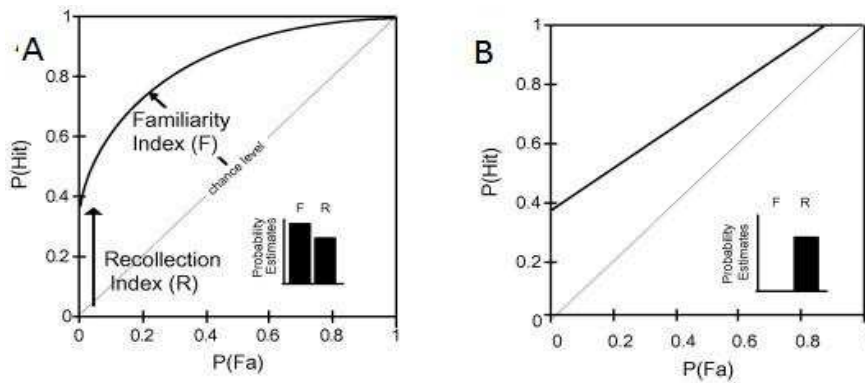
ROC soit représentée par une courbe (Wixted, 2007), montrant ainsi que le paramètre R suit la TDS. Lorsque cette fonction ROC est transformée en z-score, cela donne une fonction affine linéaire z-ROC représentée par une droite (voire figure 8). En revanche, un test de reconnaissance qui ne ferait appel qu'au paramètre R donnerait alors une ROC plutôt linéaire et une z-ROC<sup>1</sup> curvilinéaire, correspondant par conséquent à la théorie du seuil. Par conséquent, la raison pour laquelle le modèle dual de la reconnaissance est appliqué aux données ROCs est qu'il explique plutôt bien le comportement de la fonction ROC (Yonelinas, 1994), et par conséquent si la familiarité (F) et la recollection (R) devaient être évaluées, elles donneraient chacune une fonction ROC différente. Si l'on revient aux résultats expérimentaux trouvés par la méthode de dissociation de tâches, cela impliquerait que si une fonction ROC de la tâche de RA devait être calculée, elle donnerait une ROC linéaire accompagné d'une z-ROC curvilinéaire si elle mesure la recollection. À l'opposé, si la tâche de reconnaissance à choix forcé pousse le sujet à n'utiliser que la familiarité, alors sa ROC devrait être curvilinéaire et sa z-ROC linéaire. En revanche, dans une tâche de RI telle que la tâche de reconnaissance de type « Oui/Non », l'implication de la familiarité et de la recollection à la fois donnerait également une ROC curvilinéaire (Sauvage, 2010 ; Yonelinas & Parks, 2007). À ce moment, comment faire la part des deux processus dans une telle tâche ? En fait, on calcule un index d'asymétrie de la courbe ROC obtenue en calculant la pente de la droite z-ROC : plus la symétrie est élevée (i.e., plus la pente sera significativement proche de 1), plus l'index sera élevé, et plus l'implication de la familiarité sera importante, comme le suggère la figure 28. En revanche, une pente inférieure à 1 augmentera l'asymétrie de la droite z-ROC, augmentant de ce fait la sensibilité d', donnant une mesure de la recollection.

De nombreuses études ont ainsi examiné si les différentes tâches de reconnaissances suivaient les prédictions établies par le modèle dual de Yonelinas, confirmant en général ce modèle pour la tâche de RI de type « Oui/Non » (Egan, 1958 ; Kellen, & Klauer, 2011 ; Ratcliff et al., 1994 ; Rotello, McMillan, & Van Tassel, 2000 ; Yonelinas, 1997, Yonelinas & Jacoby, 1995 ; excepté les études de Heathcote et collègues : Heathcote, 2003 ; Heathcote, Raymond, & Dunn, 2006 ; ou celle de Stams, Ratcliff, & McKoon, 2012). Par exemple, Yonelinas & Jacoby (1995) ont montré que le fait de changer subtilement la forme des figures géométriques entre la phase d'étude et la phase test produisait une baisse des

---

<sup>1</sup> La transformation en z-ROC permet une normalisation des distributions des reconnaissances correctes et des fausses alarmes. La transformation donnera ainsi une moyenne de 0 et un écart-type de 1, qui sera égal à la pente de la droite z-ROC. En générale, une mesure du  $d'$ , qui représente la sensibilité de la mémoire, peut être obtenue à partir du z-ROC, avec  $d' = (\text{point d'intersection de la droite avec l'ordonnée}) / (\text{pente de la droite})$ .

performances de reconnaissance d'item, mais la pente de la droite z-ROC restait constante. Ce résultat était interprété en termes de baisse de la recollection et de la familiarité à la fois. Des résultats en rapport avec les prédictions faites par le model dual sur la forme de la courbe ROC et de z-ROC sont également obtenus pour la tâche de RA, confirmant ce modèle (Yonelinas, 1997). Cependant, Mickes, Johnson, & Wixted (2010) ont obtenus dans une série d'expériences manipulant la force de la trace, visant à augmenter la recollection, non pas une courbe ROC linéaire et une z-ROC curvilinéaire comme le prédit le modèle dual mais bien une ROC curvilinéaire et une z-ROC linéaire, suggérant ainsi que le résultat prédit par le modèle dual serait en fait le résultat non pas d'une capture efficace du signal mais plutôt du bruit ! Un certain nombre d'études ont également trouvé des courbes ROC curvilinéaires en utilisant la tâche de RA (Healy, Light, & Cheung, 2005 ; Kelley & Wixted, 2001 ; Verde & Rotello, 2004), un résultat qui semble également se confirmer dans le cas de la mémoire de la source (Glantzner, Hilford, & Kim, 2004 ; Hilford et al., 2002 ; Slotnick, 2010), qui nécessairement fait intervenir des processus associatifs durant la reconnaissance puisqu'il s'agit de récupérer l'item et son contexte (e.g., source), mais la récupération de la source serait également un processus lent et nécessiterait la recollection à la fois des items et de leur contextes, illustrée par le processus de *recall-to-reject* dans lequel cette récupération serait nécessaire pour pouvoir décider si durant une tâche de reconnaissance l'item a été associée avec la bonne source ou pas. Ces résultats en défaveur du modèle dual traditionnel de Yonelinas suggèrent que la recollection serait un processus continu tout comme la familiarité, obéissant à la TDS plutôt qu'à la théorie du seuil (i.e., « the continuous dual-process model », Ingram, Mickes, & Wixted, 2012 ; Mickes, Wais, & Wixted, 2009 ; Mickes et al., 2010 ; Slotnick, 2010). Une autre hypothèse, pas forcément incompatible avec le model dual de Wixted, serait que la tâche de la RA ne serait pas aussi « process-pure » qu'on voudrait bien le croire, impliquant également un certain degré de familiarité. En effet, lorsque Yonelinas, Kroll, Dobbins, & Soltani (1999) ont demandé à leurs sujets de reconnaître des visages à l'endroit, les estimations de R ont produit une ROC curvilinéaire, allant dans le sens des résultats récents. Cependant le fait d'inverser les visages a changé l'aspect de la fonction ROC qui n'était plus une courbe mais une droite. En effet, on peut considérer qu'inverser les visages revient à focaliser l'attention du sujet sur un traitement item-spécifique, et donc à augmenter la distinctivité.



**Figure 28.** Courbes ROCs obtenues à partir de deux tâches de reconnaissances. Le graphe A représente une ROC curvilinéaire obtenue à partir d'une tâche de RI de type « Oui/Non », impliquant aussi bien la familiarité que la recollection. Le graphe B représente une ROC linéaire obtenue à partir d'une tâche de RA, ne faisant appel qu'à la recollection. Chacun des paramètres R et F sont mesurés par un indice. Ces indices sont représentés par les bâtonnets sur les graphes (adapté de Sauvage, 2010). Lorsque la courbe ROC est suffisamment proche de la diagonale, l'indice F est petit et représente des performances ne dépassant pas le niveau de la chance.

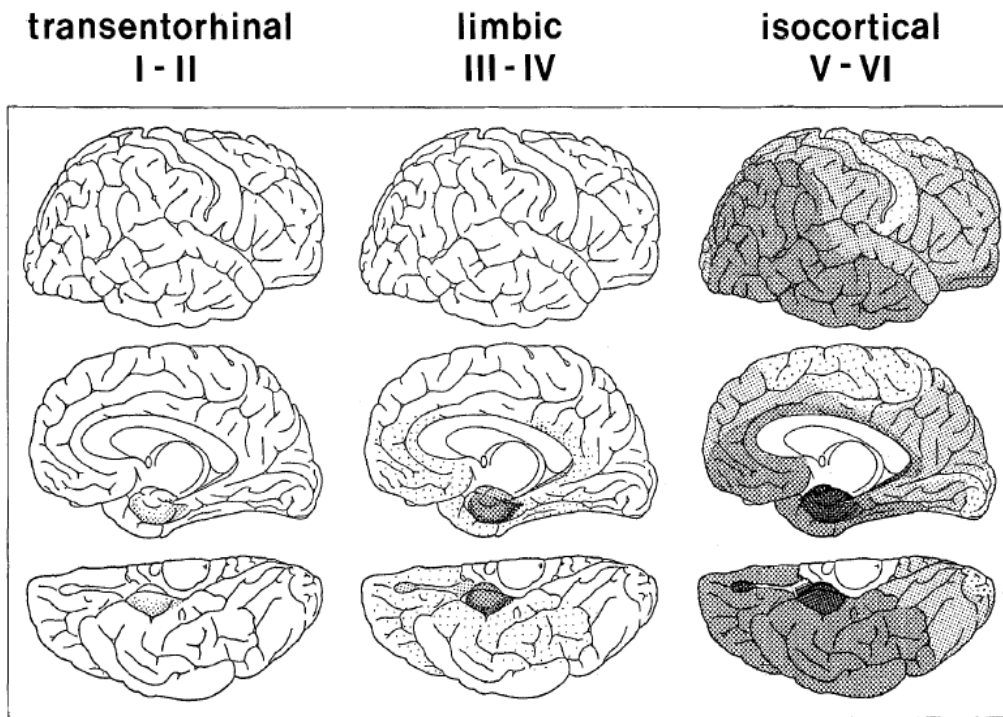
L'amnésie d'étiologie diverse (amnésie développementale, amnésie fonctionnelle, amnésie de type Korsakoff, amnésie rétrograde suite à une résection de l'hippocampe ou bien une lésion hippocampique non-chirurgicale, ...) a également été étudiée de manière exhaustive par les méthodes d'estimation des paramètres, aussi bien par la PDP (Adlam, Malloy, Mishkin, & Vargha-Khadem, 2009 ; Brandt, Gardiner, & Vharga-Khadem, 2009 ; Davide, Brown, Pojoja, & David, 2000 ; Mayes et al., 1995 ; Postma, Antonides, Wester, & Kessels, 2008 ; Verfaelli & Treadwell, 1993 ; Yonelinas, Kroll, Dobbins, Lazarra, & Knight, 1997), par le paradigme RK (Bowles et al., 2010 ; Knowlton & Squire, 1995 ; Schacter, Verfaelli, & Pradere, 1996), que par les courbes ROCs (Ogilvie & Creelman, 1968 ; Ratcliff, McKoon, & Tindall, 1994 ; Yonelinas, Kroll, Dobbins, Lazarra, & Knight, 1998). Par ailleurs, les patients présentant des lésions du CPF ont également fait l'objet d'études intéressantes concernant la dissociation recollection/familiarité utilisant les mêmes méthodes (Anderson et al., 2011). Un résultat rapporté avec consistance à travers toutes ces études, quelques soient les méthodes utilisées, est l'altération des performances des patients amnésiques sur les tâches basées sur la recollection, mais une préservation des performances sur les tâches ne nécessitant que la familiarité.

## 2. Neuropsychologie de la mémoire dans le vieillissement pathologique

Les troubles de la mémoire sont présents dans de nombreuses neuropathologies, mais seules quelques une d'entre-elles sont spécifiquement définies comme « maladie de la mémoire » (Ribot, 1885, 2005 ; Kopelman, 2002). Nous avons mentionné les amnésies dans le premier chapitre. Dans la présente section, nous nous intéressons à une autre maladie caractérisée par la destruction progressive de la mémoire épisodique : la maladie d'Alzheimer (MA), du nom du neuropsychiatre allemand qui la décrit pour la première fois ses manifestations comportementales et physiopathologiques.

- Physiopathologie de la maladie d'Alzheimer

Seule l'observation des lésions cérébrales permet de poser un diagnostic certain de la maladie, qui ne peut se pratiquer que grâce à une analyse anatomopathologique au moyen d'une autopsie. En l'absence d'une telle analyse, uniquement un diagnostic de MA « probable » est posé. L'étude anatomopathologique révèle en générale la présence d'un dépôt dense et de forme circulaire de peptides Amyloïde- $\beta$  dans l'espace extracellulaire (Gouras et al., 2000), dites plaques séniles ou plaques amyloïdes. Celles-ci sont associées à des agrégations pathologiques de la protéine Tau à l'intérieur de la cellule appelés dégénérescences neurofibrillaires (DNF), conduisant à la mort de celle-ci (Grundke-Iqbal et al., 1986). Des fragments de prolongements axonaux sont ensuite retrouvés autour des plaques séniles, provoquant une réaction inflammatoire (Pratico & Trojanovski, 2000). Ces deux lésions, conduisant à une atrophie corticale, résultant en une perte du volume cérébrale d'environ 8 à 10% en l'espace d'une dizaine d'années, suivent une progression durant laquelle différentes régions sont touchées les unes après les autres. Ainsi, les stades de Thal (Thal et al., 2002) décrivent celle des plaques séniles qui sont d'abord trouvées dans les cortex préfrontaux et le lobe temporal médian pour rapidement envahir l'ensemble du cortex. Les noyaux gris centraux, le tronc cérébral et le cervelet ne sont affectés qu'en dernier lieu. Les stades de Braak & Braak (1991) décrivent, quant à eux, la progression de la dégénérescence neurofibrillaire en six stades. La DNF commence d'abord au niveau de la couche pre- $\alpha$  du cortex transentorhinal et du cortex entorhinal (stade I), au stade II quelques DNF sont observés au niveau des cellules pyramidales du CA1, au stade III quelques DNF sont retrouvés dans diverses couches du cortex entorhinal et commencent à affecter les aires associatives isocorticales, au stade IV les DNF se répandent dans les structure sous-corticales telles que le striatum, l'amygdale, et le thalamus tout en marquant plus sévèrement le cortex transentorhinal. Et enfin, au stade V et VI, l'ensemble de l'encéphale est concerné (Figure 31).



### Neurofibrillary changes

**Figure 29.** Les stades de Braak & Braak (1991), figure publiée dans *Acta Neuropathologica* dans l'article originale.

- Les troubles de la mémoire dans la maladie d'Alzheimer

*Diagnostic de démence due à la MA.* Les critères majeurs pouvant servir de diagnostic de la MA ont été proposés aussi bien par le DSM (IV-TR et maintenant la version V) que par le NINCDS-ADRDA (National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke and the Alzheimer's Disease and Related Disorders Association, McKahn et al., 1984). La notion centrale est bien sûr celle de démence (McKahn et al., 2011). Selon le NINCDS-ADRDA, pour résumer, la présence d'une démence est attestée lorsque les signes comportementaux interfèrent avec la capacité de fonctionner de manière autonome au travail ou pour effectuer les activités, lorsque ces signes cliniques présentent un déclin par rapport à l'état cognitif et comportemental précédent du patient, lorsque ces altérations ne sont pas uniquement explicables par un antécédent ou la survenue de troubles neuropsychiatriques autres, lorsque des altérations cognitives sont constatées par un examen du statut cognitif et/ou par une évaluation neuropsychologique plus exhaustive. Enfin, la présence d'une démence est attestée lorsque cette évaluation neuropsychologique démontre une altération sur au moins

deux des fonctions cognitives comportementales (mémoire, langage, fonctions exécutives, capacités visuo-spatiales, changements dans la personnalité). Plus spécifiquement pour la démence de type Alzheimer (DTA), selon McKahnn et al. (2011), le patient doit satisfaire les critères de diagnostic de démence, et additionnellement présenter un trouble cognitif sous la forme d'un syndrome amnésique ou pas (la présentation non-amnésique incluant les autres fonctions cognitives). Contrairement à McKahnn et al. (2007), la présence d'un trouble de la mémoire épisodique est considéré comme le critère le plus saillant du diagnostique de la MA par Dubois et al., (2007). Les travaux récents semblent identifier des sous-classes de patients avec MA, les uns ayant un trouble mnésique prédominant, les autres un trouble de la mémoire de travail plutôt associé à des déficits du langage et des capacités visuo-spatiales (Stopford, Snowden, Thompson, & Neary, 2007).

*Profil mnésique de la MA.* Pour établir un profil mnésique des patients atteints de la MA, les cliniciens ont recours aux tests traditionnels de la mémoire épisodique tels que le CVLT ou le Selective Reminding test de Guber & Buschke (1988) qui sont des tests de mémoire verbale, mais aussi avec des tests tels que celui des figures complexes de Rey ou le test de reconnaissance des visages et de noms, qui évaluent en plus la mémoire pour du matériel pictural et visuel. Ces tests montrent en général des performances très altérées sur le rappel libre immédiat, le rappel différé mais aussi la reconnaissance (Graham, Emery, & Hodges, 2003).

- *Les déficits d'encodage.* Plus spécifiquement, étant donné que des tests comme le CVLT ont l'avantage d'évaluer de nombreux processus relatifs au fonctionnement de la mémoire épisodique, ces tests sont d'une importance capitale pour établir un profil spécifique de la MA. Ainsi, il a été montré que les patients MA montrent une performance de rappel libre immédiat stagnante et proche de l'effet plancher lorsqu'un paradigme d'apprentissage multi-essai est utilisé (Chang et al., 2010 ; Fox et al., 1998 ; Genon et al., 2012 ; Lacritz, Cullum, Weiner, & Rosenberg, 2001), démontrant un déficit de la capacité d'apprentissage. Même si une place importante est donnée au cortex préfrontal pour le processus d'apprentissage, cette performance altérée montre aussi que le déficit d'acquisition repose sur un ensemble de structures comprenant également les lobes temporaux et pariétaux (Spaniol et al., 2009), et mettent l'accent sur la collaboration entre le lobe temporal médian et le cortex préfrontal. Les connexions bidirectionnelles entre ces deux structures seraient donc

importantes pour l'acquisition de nouvelles informations (Conway, 2009 ; Metzler-Baddeley et al., 2011) et pourraient donner un cadre théorique pour expliquer les erreurs d'intrusion nombreuses au cours de ces rappels (Delis et al., 1991). Si l'hypothèse de l'implication des circuits frontotemporaux est confirmée, ce déficit d'acquisition pourrait aussi en partie résulter de troubles précoces et subtiles de la mémoire sémantique, résultants en une incapacité à prendre avantage des liens sémantiques entre les mots en les regroupant (Faundo et al., 2008), lors qu'une liste de mots reliés sémantiquement est présentée (Gaines, Shapiro, & Benedict, 2006). Le score de LBC et de l'ARC comme mesure de clustering sémantique ont été récemment comparé chez les patients MA, et ont montré qu'ils sont aussi efficace l'un que l'autre pour différencier les sujets sains, qui profite plus de cette stratégie des patients MA (Delis et al., 2010). Il a été montré qu'en général les patients MA produisent moins de regroupement sémantique même lorsqu'une aide leur est donnée sous forme de blocking comparés aux contrôles (Au et al., 2003). De plus, ces auteurs ont également pu différencier les légers des modérés sur la base du bénéfice apporté par un tel support environnemental. Ensemble, le déficit d'acquisition et le déficit d'utilisation d'une stratégie d'encodage telle que le regroupement sémantique ont été corrélés avec le volume de l'hippocampe gauche (Hwang, Woo et al., 2011). Des recherches ont mis en évidence un profil mnésique pratiquement similaire entre MA et le syndrome de Korsakoff qui est un syndrome amnésique (Delis et al., 1991 ; Moss et al., 1986) montrant par exemple non seulement un déficit du rappel libre immédiat, du rappel libre différé, mais aussi de la reconnaissance. Ces déficits ne sont pas sélectifs par rapport à un type de stimulus en particulier, ils concernent aussi bien du matériel verbal, des images, des localisation spatiales, des couleurs ou des visages (Moss et al., 1986). Ce type de résultats suggèrent que les patients MA ne bénéficierait pas non plus d'une aide environnementale apportée pour augmenter le traitement item-spécifique. Cependant, peu d'études ont tenté d'évaluer l'effet de la distinctivité sur la performances mnésiques dans la MA et ont montré des résultats plutôt conflictuels. Par exemple, réduction considérable de l'effet d'isolation chez ces patients comparés aux âgés contrôles a été observée par Vitali et al. (2006). Mais des résultats opposées ont été également trouvées, montrant au contraire aucune différence entre les âgés et les patients, par exemple pour l'effet de génération (Lipinska, Bäckman, Mäntyla, & Vitanen, 1994) ou bien l'effet SPT (Lekeu, Van der Linde, Moonen, Salmon, 2002). Dans cette dernière étude, les auteurs manipulaient également la familiarité des items,

aboutissant à des patterns de bénéfice de la SPT opposés chez les âgés et les patients MA : les premiers montrant un bénéfice important de la SPT lorsque des actions moins familières ont été performées, tandis que les second montraient un bénéfice plus grand que les âgés et sur des actions plutôt familières. Même si l'hypothèse d'un déficit item-spécifique n'a été testée que rarement, l'ensemble de ces résultats semblent suggérer non seulement une atteinte des processus sémantique (relationnels) chez la démence de type Alzheimer, mais également d'une atteinte des processus item-spécifiques.

- Les déficits de récupération. Les déficits au niveau de la récupération de l'information est également constaté chez les patients MA, classiquement par un oubli rapide (Delis et al., 1991). Par exemple, Hart, Kwentus, Harkins, & Taylor (1988) ont montré qu'après avoir atteint le critère défini d'apprentissage lors d'une tâche de dessin d'objets, les patients avaient déjà oublié ces objets et les dessins après 10 mn comparés aux contrôles, définissant un oubli passif. De plus, tout comme le manque de bénéfice du support environnementale apporté à l'encodage, ils sont également dans l'incapacité de bénéficier d'un support environnementale apporté lors de la récupération, par exemple comme rappel indicé (Libon et al., 1996 ; Wagner et al., 2012), D'ailleurs le rappel indicé pourrait constituer un marqueur cognitif à part entière de la MA en association avec des marqueurs biologiques tels que le fluide cérebrospinal (voire Carlesimo, Perri, & Caltagirone, 2011, pour une revue). Quelques travaux ont essayé de comparer les performances de rappel et de reconnaissance chez les DTA mais elles sont étonnement peu nombreuses et les résultats qu'elles rapportent sont quelques peu divergents : parfois une performance déficitaire est rapportée dans les deux conditions (Delis et al. 1991 ; Backman et al ; 2001), parfois une performance plus déficitaire est rapportée sur la condition de rappel libre comparativement à la condition de reconnaissance (Bartok et al. 1997 ; Brandt et al. 1992 ; Kramer et al ; 1988). Il faut également mentionner une suppression anormal de l'effet d'interférence proactive (Lekeu et al., 2010) ainsi qu'une susceptibilité accrue aux fausses reconnaissances (Aronoff, Gonnerman, Almor, Arunachalam, Kempler, & Andersen, 2006; Budson, Daffner, Desikan, & Schacter, 2000; Multhaup, Balota, & Faust, 2003; Westerberg et al., in press). En général, il a été constaté que le taux de fausses reconnaissances est anormalement bas chez ces patients lorsque la liste n'est pas répétée lors de l'encodage ou lors de la récupération, comparés aux âgés



biens portants. Cependant, avec une répétition de la liste, les âgés font moins de fausses reconnaissances tandis que les patients montrent une susceptibilité accrue (Budson et al., 2000). Ces résultats lors de la récupération font également échos aux observations faites lors de l'encodage en termes de processus mnésiques impliqués. En effet, la double altération des processus item-spécifique/relationnel au niveau de l'encodage pourrait très bien correspondre à la récupération à la double altération des processus de recollection. En revanche les études diffèrent quant à savoir si la familiarité est atteinte ou non et dépendrait du type de méthode utilisée pour évaluer les deux processus (Remember/Know, Process Dissociation Procédure, courbes ROC, etc ; Ally, Gold, Budson, 2009 ; Dalla Barba, 1997). Par exemple, Dalla Barba put mettre en évidence que lors de la tâche de reconnaissance les patients produisent non seulement moins de réponses correctes comparés aux contrôles mais associent également peu de réponses de type Remember (R) à ces réponses alors qu'autant de réponses Know (R) sont associés aux items cibles chez les deux groupes, suggérant que la recollection est bien atteinte mais que la familiarité serait préservée, du moins dans les stades précoces de la maladie. A l'opposée, Ally et al. (2009) montrent une atteinte des deux processus en utilisant la méthode des courbes ROC (voire les appendices pour les descriptions détaillées de ces méthodes).

- Evaluations de la mémoire épisodique par la RV dans la maladie d'Alzheimer

Bien que de nombreuses études aient évalué la mémoire spatiale dans la MA en utilisant la RV soit en reproduisant la piscine de Morris (Hort et al., 2007 ; Laczo et al., 2009) soit sur des environnements et des tâches plus écologiques tels que des environnements urbains ou naturels (Kalova et al., 2005 ; Kessels, Van Doormal, & Janzen, 2011), il faut constater qu'il y a à ce jour relativement peu d'études se présentent comme explicitement évaluant la mémoire épisodique en tant que telle bien que le paradigme utilisé soit toujours celui de la navigation spatiale. Nous n'en dénombrons que deux : l'une effectuée par Widmann, Beinhoff, Riepe (2012) et l'autre par Plancher, Tirard, Gyselinck, Nicolas, & Piolino (2012).

Widmann et al. (2012) ont comparé les performances de mémoire épisodique de deux groupes de personnes âgées contrôles et souffrant de DTA précoce, à l'aide d'un quartier virtuel dans lequel les personnes devaient mémoriser un trajet effectué et les enseignes de certains magasins selon une procédure inspiré du CVLT, donc en utilisant le paradigme de

rappel libre multi-essais. Différents indices de mémorisation étaient utilisés pour caractériser le profil de chaque groupe: 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 saines, les résultats ont montré une correspondance quasi parfaite entre les résultats (rappel) au CVLT et les résultats au test RV. En revanche, pour le groupe de personnes souffrant 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 sur la base de ce résultat 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 saines, 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 uniquement, rendant cet indicateur particulièrement sensible à la pathologie.

Celle de Plancher et al. (2012) reprenait l'environnement virtuel utilisé précédemment auprès des âgés (Plancher et al., 2010) où les participants doivent effectuer un tour en voiture dans un quartier de Paris simulé par ordinateur. Cette procédure a permis de comparer des âgés contrôles aux personnes MCI et aux patients avec MA sur le rappel des objets, de l'ordre temporel des événements mais aussi sur les éléments spatiaux de la navigation. Une mesure du binding est aussi administrée additionnellement. Les résultats montrèrent sans équivoques que les patients MCI comme les MA présentaient une altération des performances sur chacune de ces mesures comparés aux contrôles, avec une atteinte toutefois moins importante dans le groupe des MCI.

Ce fut également la première étude à comparer l'effet de la navigation active à la navigation passive dans ces trois populations. Contrairement aux études citées dans le chapitre II effectués dans le domaine, les auteurs choisirent d'administrer la variable navigation en tant que mesure répétée, tous les participants passant d'abord la navigation active, puis la navigation passive. Ils montrèrent un effet principal de la navigation, avec une supériorité de la navigation active comparée à la navigation passive dans tous les groupes sur les performances de rappel total, mais pas sur le rappel des détails pour lequel les performances

des âgés biens portantes étaient détériorées. Pour le rappel différé, l'effet de la navigation active était atténué dans tous les groupes et disparaissait chez les patients AD.

Dans l'ensemble, les études effectuées en utilisant la RV conduisent à plusieurs constats majeurs : tout d'abord, une évaluation écologique de la mémoire épisodique n'enlève rien à l'objectivité des mesures administrées, bien au contraire elle permet non seulement de transposer des procédures traditionnelles comme le paradigme de rappel libres (ou apprentissage) multi-essais déjà utilisé par le CVLT et d'autres tests similaires (e.g., Widmann et al., 2012), mais aussi de mettre en place de nouveaux paradigmes mieux disposés pour l'évaluation de certains processus (Plancher et al., 2012) jusque là impossible ou difficilement mesurable sur des procédures traditionnelles comme le binding et l'évaluation simultanée du quoi, du où et du quand, les trois éléments contextuels définissant un souvenir épisodique selon la définition de Tulving. De plus, ces études permettent également de distinguer différentes pathologies liées à l'âge (MCI vs MA) mais aussi les pathologies des conditions contrôles (MA vs. Agés) démontrant alors une bonne validité de construit. L'évaluation de la mémoire épisodique de manière écologique, surtout en utilisant la RV présente par conséquent un intérêt important dans le champ de la neuropsychologie aussi bien cognitive que clinique.

### **3. Les troubles de la mémoire dans le traumatisme crânien**

- *Brève définition du traumatisme crânien*

Le traumatisme crânien (TC) est l'une des causes de lésions crânio-cérébrales la plus commune en France. Cependant, l'incidence et la prévalence de la neuropathologie en sont pas connus (UNAFT, [www.traumacrancien.org](http://www.traumacrancien.org)). Il s'agit également de l'une des neuropathologies fréquemment prises en charge par les neuropsychologues (Lezak, 2004). Les patients peuvent présenter des dommages cérébraux de sévérité variable allant d'une simple concussion aux lésions plus profondes dont les plus communes peuvent être focalisées ou de type axonale diffuses (Adam, Doyle, Ford, Gennarelli, Graham, & McLellan, 1989), souvent causées par la violence d'une force extérieure. En France, la cause la plus commune d'un TC est le fait d'accidents de la voie publique (Bloom et al., 2007). Ces différentes lésions résultent de mécanismes variés, mais résultants le plus souvent d'un mouvement violent de l'encéphale dans la boîte crânienne dans plusieurs directions, provoquant une collision du pôle frontal du cerveau avec la surface interne du crâne (« coup »), puis d'un

« contrecoup » dans la direction opposée (Zhang et al., 2009), endommageant non seulement le cortex préfrontal mais aussi des structures du lobe temporal médian dont le rôle dans le fonctionnement de la mémoire est primordial (Buckner, 2004 ; Squire, 1992). Les lésions focales peuvent être dues à des objets pénétrants ou contendant, provoquant une fracture de la boîte crânienne le long des lignes de sutures ou bien une brisure à un endroit focalisé, résultant parfois en une déformation du crâne. A partir de là, deux types de TC sont distingués : les TC fermés (ou *closed head injury*) pour lesquels les dommages cérébraux incluent majoritairement des lésions diffuses avec une relative préservation de la boîte crânienne malgré la présence de fractures, tandis que les TC ouverts (*open head injury*) sont constatés lorsque le crâne a subi une déformation significative de sa structure au point de rendre toute chirurgie impraticable (conduisant à une issue plutôt fatale) ou bien lorsque la boîte crânienne a été pénétrée, produisant ainsi une lésion plus focale (Lucas & Addeo, 2006). Dans notre petite revue, nous considérons uniquement les TC fermés.

Ces modifications structurales lors du trauma initial sont ce qu'on appelle le traumatisme primaire, résultat immédiat de l'impact physique. Les troubles neurologiques n'apparaissent en général que plus tard, lorsque ce traumatisme primaire évolue en traumatisme secondaire (lorsque l'hémorragie cérébrale est constatée) et constitue le plus souvent la cause première de mortalité chez les patients hospitalisés d'urgence et remplissant les critères d'un traumatisme sévère (Talving et al., 2013). Cependant, avant même que le patient n'atteigne l'hôpital, l'hémorragie, l'hypoxémie et l'hypotension (elle-même conséquence indirecte de l'hémorragie) sont fréquentes, provoquant des dommages irréversibles au cerveau. En effet, l'hémorragie interne augmente la pression intracrânienne, provoque une baisse de la perfusion cérébrale, aboutissant de ce fait aux œdèmes cérébraux et à l'ischémie, doublant ainsi le risque de mortalité (Chestnut et al., 1993 ; Eriksson, Barletta, Figueroa et al., 2012 ; Narayan et al., 1982 ).

- *Les troubles de la mémoire dans le traumatisme crânien*

Les lésions au niveau du lobe temporal ainsi que du lobe frontale, qui sont très communes et souvent les résultats de mouvements de « coup » et de « contrecoup », peuvent être responsables des troubles de la mémoire mais aussi des fonctions exécutives (Viano et al., 2005). De plus, les lésions axonales diffuses peuvent majorer ces troubles, notamment à travers la disruption des voies fronto-temporales (Gu et al., 2013). Il est donc possible d'inférer à partir de cette configuration, que les aspects stratégiques de la mémoire, faisant

appel au contrôle exécutif seraient touchés. Nous décrivons brièvement une revue de littérature allant en ce sens, notamment sur des mesures de rappel libres, d'apprentissage, de regroupement sémantique, de reconnaissance, mais aussi de la susceptibilité à l'interférence proactive et des fausses reconnaissances. Le trouble de la mémoire épisodique est également constaté chez les patients avec un TC (Mangels et al. 2002 ; Schmitter-Edgecombe & Anderson, 2007 ; Anderson & Schmitter-Edgecombe, 2009 ; Miotto et al. 2010 ; Tsirka et al. 2010) et implique notamment une sensibilité accrue à l'interférence proactive, (Numan et al. 2000) et aux fausses reconnaissances (Ozen, Skinner, & Fernandes, 2010) ainsi qu'un déficit d'utilisation de stratégies d'encodage efficaces (Bruce & Echemendia, 2003). Ainsi, ces troubles de la mémoire épisodique, cumulés avec d'autres troubles cognitifs (i.e., troubles dysexécutifs, réduction de la vitesse de traitement, Fichtenberg et al., 2001), mettent les patients souvent en échec dans la réalisation d'activités de la vie quotidienne (Johansson et al. 2007) et posent le problème d'une éventuelle réinsertion sociale et professionnelle (Cohadon et al. 2008).

- L'apprentissage au cours d'essais de rappels multiples. L'apprentissage au cours des essais ne semble pas être affecté en soi dans le TC, car les patients avec un TC modéré à sévère arrivent à apprendre, même si la vitesse de cet apprentissage est plus lente que les contrôles, et cela a été montré aussi bien sur une procédure de rappels libres multi-essais pour un matériel visuel (Shum, Harris, & O'Gorman, 2000) que verbal (Deluca et al., 2000). Toutefois le déficit du rappel libre est quasi-systématiquement rapporté (Deluca et al., 2000 ; Kersel et al., 2001 ; Strangman et al., 2008). Deluca et collègues ont par exemple suggéré la possibilité qu'il y aurait des sous-groupes de patients avec un TC à capacité d'apprentissage égale, mais différant sur les performances aux tests des fonctions exécutives. Ainsi, ceux qui obtiennent des performances très faibles sur ces tests ont également des déficits de rappel libres mais également de reconnaissance (voir ci-après). Curtiss et al. (2001) ont également suggéré qu'il existerait différents sous-groupes distinguables par leurs performances sur diverses mesures du CVLT censées reposer sur le fonctionnement exécutif (e.g., regroupement sémantique), l'encodage en mémoire à long-terme (essai 5 du rappel libre), la consolidation (e.g., la susceptibilité à l'interférence proactive), la rétention (e.g., le rappel libre différé) récupération (e.g., reconnaissance vs. rappel libre) et les capacités de contrôle (e.g., la capacité à résister aux fausses reconnaissances).

- La reconnaissance. Les études rapportent une altération de la capacité de reconnaissance, aussi bien en utilisant un matériel visuel (e.g., des figures, géométriques ou non, (Brooks, 1974, Brooker & George, 1984) qu'un matériel verbal (Deluca et al., 2000 ; Strangman et al., 2008 ; voire cependant Vandeploeg, Crowell, & Curtis, 2001, pour un résultat différent). Toutefois, il n'existe à notre connaissance qu'une seule étude ayant directement comparé le rappel à la reconnaissance afin d'avoir une idée de l'importance du déficit du rappel libre (Duchnick, Vanderploeg, & Curtiss, 2002), rapportant de meilleures performances de reconnaissance par rapport à celles du rappel libre. Ces résultats sont également conformes à l'observation d'un meilleur rappel indicé comparé rappel libre (Vakil & Oded, 2003). Il est possible d'inférer que les patients avec un TC modéré à sévère bénéficient également de la reconnaissance en dépit d'une performance de reconnaissance moindre comparée à celle des contrôles. Ce bénéfice a été également montré en ayant recours aux mesures de débit sanguin régional (rCBF ou regional cerebral blood flow) utilisé dans des études de neuroimagerie comme le PETscan par une activation frontale bilatérale lors de la tâche de reconnaissance aussi bien chez les contrôles que chez les patients comparé à une activation préfrontale réduite lors d'une tâche de rappel (Ricker, Müller, Zafonte, Black, Millis, & Chugani, 2001).
- Regroupements sémantiques. Comme dans le vieillissement normal, il semblerait que la mémoire sémantique des patients avec un TC soit préservée, ce qui aboutit à un pattern de performance similaire quant à la capacité de regroupements sémantiques. En effet, il a par exemple été montré que ces patients sont capable d'utiliser une stratégie de regroupements sémantiques lorsque les items de la liste sont bloqués par catégories, en revanche leurs score de regroupements est inférieur à celui des contrôles lorsque le matériel à mémoriser n'est pas préalablement organisé que les items entretiennent une relation sémantique ou pas (Strangman et al., 2008 ; Stallings, Boake, & Sherer, 1995). Ainsi, comme les âgés, ces patients n'auraient pas de déficits de la mémoire sémantique mais plutôt un déficit d'auto-initiation des stratégies basés sur la mémoire sémantique. Ce type de résultat rend compte d'un trouble sous-tendant les performances de rappel libre, dans la mesure où regrouper permet d'optimiser le rappel. Ces mêmes auteurs ont pu montrer que les performances de rappel et de reconnaissances augmentaient significativement lorsque l'utilisation du regroupement était favorisée par un « blocking » (Levin & Goldstein, 1986 ; Strangman et al., 2008).

- Sensibilité à l'interférence proactive. IL faut constater que peu d'études ont évalué la sensibilité à l'interférence des patients avec un TC, malgré l'utilité d'une telle mesure dans le cadre clinique. Un test tel que le CVLT ne permet généralement pas d'observer cette sensibilité à l'interférence proactive chez ces patients (e.g., Crosson et al., 1988 ; Jacobs & Donders, 2008 ; Numan, Sweet, & Ranganath, 2000), et ce même lorsque les patients et les contrôles sont appariés en performance d'apprentissage initial (Vandeploeg et al., 2001). Ces derniers ont suggéré qu'une telle absence d'effet d'interférence chez ces patients pouvait traduire un déficit au niveau de la consolidation de l'information apprise, sans apporter plus de détails sur les mécanismes cognitifs qui sous-tendraient un tel déficit. Il est également possible qu'une procédure comme celle du CVLT manque de sensibilité suffisante pour détecter un effet d'interférence chez ces patients. A ce jour, nous ne connaissons pas d'études ayant utilisé d'autres paradigmes plus traditionnels (e.g., la procédure AB-AC, Postman & Underwood, 1973 ; relâchement de l'effet d'interférence, Wickens, Born, & Allen, 1963).
- Sensibilité aux fausses reconnaissances. Contrairement à l'effet d'interférence, une sensibilité accrue aux fausses reconnaissances chez les patients avec un TC à sévérité variable rapporté par les chercheurs dans le domaine de la neuropsychologie clinique, pour les fausses reconnaissances de source (Ozen et al., 2010), les fausses reconnaissances sémantiques (Reis & Marks, 2006), mais aussi pour l'effet du misleading information paradigm (Dockree et al., 2006). Par exemple, au moyen du paradigme DRM, il a été possible pour Reis & Marks (2006) de montrer une grande propension des patients à reconnaître les leurres critiques sémantiques qui n'ont jamais été étudiés, mais qui ont néanmoins pu être activés dans le réseau sémantique. Due à la rareté des études, nos connaissances quant aux mécanismes cognitifs impliqués dans leur sensibilité aux fausses reconnaissances ne sont pas ou très peu avancées contrairement à d'autres neuropathologies comme la maladie d'Alzheimer ou bien les syndromes amnésiques (e.g., syndrome de Korsakoff, Delis et al., 1991). Cependant, le fait de constater une plus grande altération des performances sur des tâches de jugements de source, ou les patients modéré à sévère font une plus d'erreurs d'attribution de la source que les contrôles notamment sur une tâche de jugement de célébrité (fame judgement task, Dywan et al., 1993) n'est pas en désaccord avec

l'utilisation de paradigmes différents basés essentiellement sur des tâches de reconnaissances classiques de type Oui/Non.



# VALORISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

### Articles publiés (n=5) , en cours de publication (n=3) et soumis (n=2)

- Wallet, G., Sauzéon, H., **Arvind Pala, P.**, Larrue, F., Zheng, X., & N’Kaoua. (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), 417-423.
- Sauzéon, H., Déjos, M., Lestage, P., **Arvind Pala, P.**, & N’Kaoua., B (2012) Developmental differences in explicit and implicit conceptual memory tests: A processing view account. *Child Neuropsychology*, 18(1), 23-49.
- 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. Aging, Neuropsychology, & Cognition*, 1-22, iFirst, DOI: 10.1080/13825585.2012.706247
- Sauzéon H., **Arvind-Pala P.**, Larrue F., Wallet G., Déjos M., Zheng X., Guitton, P., & N’Kaoua B. (2012). The assessment of episodic memory using virtual reality, *Experimental psychology*, 59(2), 99-108.
- Taillade, M., Sauzéon, H., **Arvind Pala, P.**, Déjos, M., Larrue, F., Gross, C., & N’Kaoua, B. (2013). Age-related wayfinding differences in real large scale environments : Detrimental motor control effects during spatial learning are mediated by executive decline ? *PloS ONE*, 8(7): e67193. DOI:10.1371/journal.pone.0067193
- **Arvind Pala** et al. (accepté). Everyday memory and its relationship with executive functioning and episodic memory in healthy older adults and young traumatic brain injured patients. *Archives of Clinical Neuropsychology (accepté avec révision)*.
- Taillade, M., Sauzéon, H, Déjos, M., **Arvind-Pala, P.**, Wallet, G., Gross, C., & N’Kaoua, B. (2013) Cognition spatiale et vieillissement : les nouveaux éclairages offerts par les études utilisant la réalité virtuelle. *Revue de Neuropsychologie & Neurosciences cognitives et cliniques (Accepté avec révisions)* (2012).
- Arvind Pala, P., N’Koua, B., Déjos, M., Taillade, M. Auriacombe, S., & Sauzéon ,H. (soumis). Everyday-like memory for objects in aging and Alzheimer’s disease assessed in a visually complex environment: the role of executive functioning and episodic memory. *Journal of Neuropsychology*.
- Arvind Pala, P., N’Kaoua, B., Taillade, M., & Sauzéon, H. (soumis). Effects of age and active navigation on episodic memory processes using a virtual apartment task. *Cognitive Psychology*.

Les articles non présentés dans la thèse sont joints en Annexe IV.

## Conférence invitée (n=1)

- **Arvind Pala, P.**, N'Kaoua, B., Taillade, M., Larrue, F., & Sauzéron, H. (2013) Age and active navigation effects on episodic memory : a study using Virtual Reality. Donders Discussions 2013 : The Aging Brain, Donders Institute for brain, behaviour and cognition, 31st Oct.-1st Nov., Nijmegen, Netherlands.

## Communications orales (n=4)

- **Arvind Pala.**, Sauzéron, H., Wallet, G., Larrue, F., Zheng, X., & N'Kaoua, B. (2009). The assessment of episodic memory using virtual reality. *Colloque des Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives CJCSC'09(Toulouse)*
- **Arvind Pala, P.**, Sauzéron, H., Wallet, G., Larrue, F., Déjos, M., & N'Kaoua, B. (2010). Evaluation écologique de la mémoire épisodique dans le vieillissement normal par la réalité virtuelle. *Journées de l'Ecole Doctorale, 3-4 Juin, La Teste.*
- **Arvind Pala, P.**, Sauzéron, H., Wallet, G., Larrue, F., Déjos, M., & N'Kaoua, B. (2010). Impact de la navigation active et du vieillissement cognitif sur la mémoire épisodique dans un environnement virtuel : résultats préliminaires. *Séminaires de l'équipe CHIC, laboratoire EA 4136 Handicap & Système Nerveux.*
- **Arvind Pala, P.**, Sauzéron, H., Déjos, M., Mazaux, J.M., Larrue, F., Simion, A., Lozes, S., Scaglia, E., & N'Kaoua, B. (2012). Mémoire épisodique et relation au fonctionnement exécutif chez des personnes âgées et des jeunes traumatisés crâniens : résultats préliminaires d'une étude utilisant la réalité virtuelle. *5èmes Journées Internationales de la Neuropsychologie des lobes frontaux et des fonctions exécutives, 19 et 20 Janvier, Angers.*

## Communications affichées (n=4)

- Rodrigues, J., **Arvind Pala, P.**, Taillade, M., Wallet, G., Sauzéron, H., & N'Kaoua. (2009) Facilitation du transfert des connaissances spatiales du virtuel au réel à l'aide d'un apprentissage actif : influence du réalisme de l'environnement virtuel, du délai de rétention et du déclin cognitif lié au vieillissement. *Poster présenté au CJCSC (Toulouse).*
- **Arvind Pala, P.**, Sauzéron, H., Wallet, G., Larrue, F., Déjos, M., & N'Kaoua. (2010). Evaluation de la mémoire épisodique par la réalité virtuelle dans le vieillissement. *Poster présenté au XIème colloque international sur le vieillissement cognitif, JEV 2010, Liège, 23-24 Septembre.*
- Déjos, M., Sauzéron, H., **Arvind-Pala, P.**, Falière, A., N'Kaoua, B. (2012) The identification of the four cognitive patterns with a unique virtual tool: a pilot study. *40th Annual Meeting of the International Neuropsychological Society. February 15-18, Montréal, Québec, Canada.*
- **Arvind Pala, P.**, Sauzéron, H., Déjos, M., & N'Kaoua, B. (2012). Médiateurs cognitifs de la relation entre l'âge et le déclin de la mémoire épisodique. *Poster présenté aux*

*jours du printemps de la société neuropsychologique de langue française,  
approche populationnelle du vieillissement, Bordeaux, 31 Mai-2 Juin.*

Annexe III

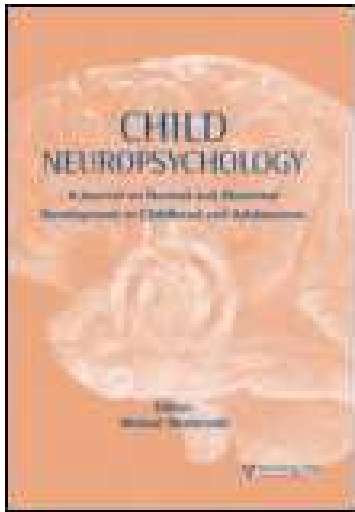
**MANUSCRITS PUBLIES OU ACCEPTES NON  
PRESENTEES DANS LA THESE**

This article was downloaded by: [Prashant Pala]

On: 23 October 2013, At: 03:22

Publisher: Routledge

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/ncny20>

### Developmental differences in explicit and implicit conceptual memory tests: A processing view account

Hélène Sauzéron<sup>a</sup>, Marie Déjos<sup>a</sup>, Philippe Lestage<sup>b</sup>, Prashant Arvind Pala<sup>a</sup> & Bernard N'Kaoua<sup>a</sup>

<sup>a</sup> University of Bordeaux 2, Bordeaux, France

<sup>b</sup> Institut Universitaire de Formation des Maîtres, de Limoge, Limoge, France

Published online: 15 Apr 2011.

**To cite this article:** Hélène Sauzéron, Marie Déjos, Philippe Lestage, Prashant Arvind Pala & Bernard N'Kaoua (2012) Developmental differences in explicit and implicit conceptual memory tests: A processing view account, *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 18:1, 23-49, DOI: [10.1080/09297049.2011.557652](https://doi.org/10.1080/09297049.2011.557652)

**To link to this article:** <http://dx.doi.org/10.1080/09297049.2011.557652>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms &

Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

## **CE** Developmental differences in explicit and implicit conceptual memory tests: A processing view account

Hélène Sauzéron<sup>1</sup>, Marie Déjos<sup>1</sup>, Philippe Lestage<sup>2</sup>, Prashant Arvind Pala<sup>1</sup>, and Bernard N’Kaoua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Bordeaux 2, Bordeaux, France

<sup>2</sup>Institut Universitaire de Formation des Maîtres, de Limoge, Limoge, France

The present study addressed contradictory results in childhood literature about conceptual priming. Based on the *processing view*, two forms of conceptual priming were investigated across two experiments in children aged from 7 to 16: associative priming (using the free-association test) and relational (categorical) priming (using the categorical exemplar generation test) as well as their explicit memory measure counterparts (the associative-cued recall and the category-cued recall). Experiment 1 compared age differences in associative and relational (categorical) priming. Experiment 2 focused on relational (categorical) priming with manipulations of blocked/unblocked words per category. The results showed that (a) associative priming was unchanged in children aged from 7 to 16, whereas relational (categorical) priming improved from 7–9 to 13–16 years old, and (b) age differences in relational (categorical) priming still occurred under unblocked conditions and blocked condition, while age differences in explicit measures were reduced under blocked conditions.

These findings were discussed in line with the debate between the system and processing view and in terms of knowledge and automaticity development.

**Keywords:** Conceptual priming; Memory measures; Childhood; Associative processing; Relational processing.

It is already well established that memory is a cognitive function that progresses during child development. Most studies on the development of long-term memory (LTM) have been designed to address the distinction between “implicit vs. explicit memory” (see Schneider, 2000, for a review). Explicit memory requires a conscious or deliberate remembering of previous names, places, dates, and events. It is classically assessed with direct memory tasks, such as free or cued recall, or even the old-new recognition of items that have been intentionally memorized (Schacter, 1990). In contrast, implicit memory refers to an unconscious or involuntary retrieval of information from memory. It is most notably measured in the repetition priming effect, where the unconscious recovery of one item is facilitated when this item has been previously studied, in comparison with other unstudied items (Schacter, 1990). For example, priming is more often revealed when the instruction

---

Address correspondence to Dr. Hélène Sauzéron, PhD, University of Bordeaux 2, Lab., EA487-Cognition & Human Factors, 146 rue Léo Saignat, Bordeaux, 33076, France. E-mail: helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr

---

to “associate CAT with the first word that comes to mind” produces the target response “MILK” when this item was present at the study (i.e., a primed condition) than when it was not (i.e., a *unstudied* condition). This priming effect is seen as being the byproduct of conceptual processes because it depends on the meaning, or the semantic relationships, between the prime cue and the target, and, thus, it is labeled “conceptual priming.” In contrast, the priming effect is called “perceptual” when the implicit memory task is driven by perceptual relationships between the prime cue and the target, as in the picture identification task: After studying pictures of objects during the test phase, the subject must identify a set of degraded pictures as quickly as possible, when some of the pictures had been previously studied and others not.

While the findings for the perceptual priming performance might be consensual in child studies, the results from the conceptual priming performance are still in debate due to a discrepancy in the results between studies. The present article was specifically designed to investigate implicit and explicit conceptual memory development during childhood according to the new extension of the *processing view*.

## IMPLICIT-EXPLICIT MEMORY AND THEORETICAL EXPLANATIONS

In the LTM area, two main theories have received particular attention for the questions raised about the origins of implicit-explicit dissociation. According to the *memory system view*, both implicit and explicit memory are seen as two different and independent memory systems (e.g., Moscovitch, 1992, 2008; Squire, 1992, 1994; Tulving & Schacter, 1990). According to the paradigm of double dissociation (Gabrieli, Fleischman, Keane, Reminger, & Morrell, 1995; Teuber, 1955), several studies have aimed to create an inventory of the subject’s or task’s variables, impacting, respectively, either on implicit or on explicit memory measures. For instance, brain-injured patients with amnesia perform very poorly on explicit memory tests, whereas they perform normally, or near-normally, on implicit tests (Yeates & Enrile, 2005; for different results, see Keane et al., 1997). Among the recent developments of the *memory systems view*, research based on the memory model by Moscovitch (1992, 2008) has fully increased. This model distinguishes four memory components. The first two are primarily implicit and respectively include the “*Procedural Memory*” component, which mostly involves the basal ganglia to perform notably rule-learning and sensorimotor skills, and the “*Knowledge Memory*” component, which mostly involves the nonfrontal cortex and notably underlies repetition priming. The latter component is seen as being divided into two parts: “conceptual records” and “perceptual records.” The “conceptual records” part, which particularly involves the temporal cortex, would consist of general and abstract knowledge acquired during the lifespan and would underlie conceptual priming effects. The “perceptual records” part implying the parietal and occipital cortices, in particular, would support perceptual knowledge (sensory forms) and would underlie perceptual priming. Finally, the other two components are primarily explicit. The third component is the “*Associative Memory*” component (with the hippocampus, parahippocampal gyrus, entorhinal and perirhinal cortices, mammillary bodies, and dorsomedial nucleus of the thalamus, cingular cortex, and fornix), which is mostly involved in associative binding (i.e., the content and context of information) for the encoding, storage, and recollection of new information, as required in word-pair learning tests. The fourth component, the “*central system*” (primarily involving the frontal cortex), is seen as a working memory (Baddeley, 1986, 1999), which notably allows the initiation of strategic operations in the encoding and retrieval phases in order to improve the efficiency of the associative



memory. This cooperation between the associative and central systems is often required in order to perform traditional explicit memory tests (e.g., to recall a related list of category exemplars).

In contrast, according to the alternative perceptual versus the conceptual processing view (Blaxton, 1989; see Roediger & McDermott, 1993 for a review), the apparent dissociation between implicit and explicit memory reflects confusion with the perceptual (i.e., appearance- or form-based) versus conceptual (i.e., semantic or meaning-based) nature of information required by the task. However, perceptual processing is much more involved in implicit memory tests than in the explicit memory tests involving conceptual processing more than perceptual processing and is associated with a higher memory performance (Barry, 2007; Richardson-Klavehn, Gardiner, Rosalind, & Java, 1996; Roediger & Blaxton, 1987; Roediger, Gallo, & Geraci, 2002).

## DEVELOPMENTAL MEMORY DIFFERENCES

Concerning the developmental differences on these various memory tests, the following findings can be put forward (for a review, see Schneider, 2000): (a) there were strong differences on the explicit tests, indicating that the memory processes involved in these tests improve during childhood (Anooshian, 1997; Kail, 1990; Parkin, 1997; Sherry & Schacter, 1987); (b) there were no age-related differences on the perceptual implicit tests, suggesting that the memory processes involved in these tests are stable during childhood (Barry, 2007; Mecklenbräuker, Hupbach, & Wippich, 2003; Parkin, 1997; for different results, see Cykowicz, Friedman, Snodgrass, & Rothstein, 2000); (c) there were discrepant age-related differences on the conceptual priming tests, where the age differences were sometimes reported (e.g., Barry, 2007; Mecklenbräuker et al., 2003; Murphy, McKone, & Slee, 2003; Perruchet, Frazier, & Lautrey, 1995) and sometimes not (e.g., Anooshian, 1997; Billingsley, Smith, & McAndrews, 2002; Perez, Peynircioglu, & Blaxton, 1998). These discrepancies represent a challenging issue in the theoretical debate between the two memory views presented above.

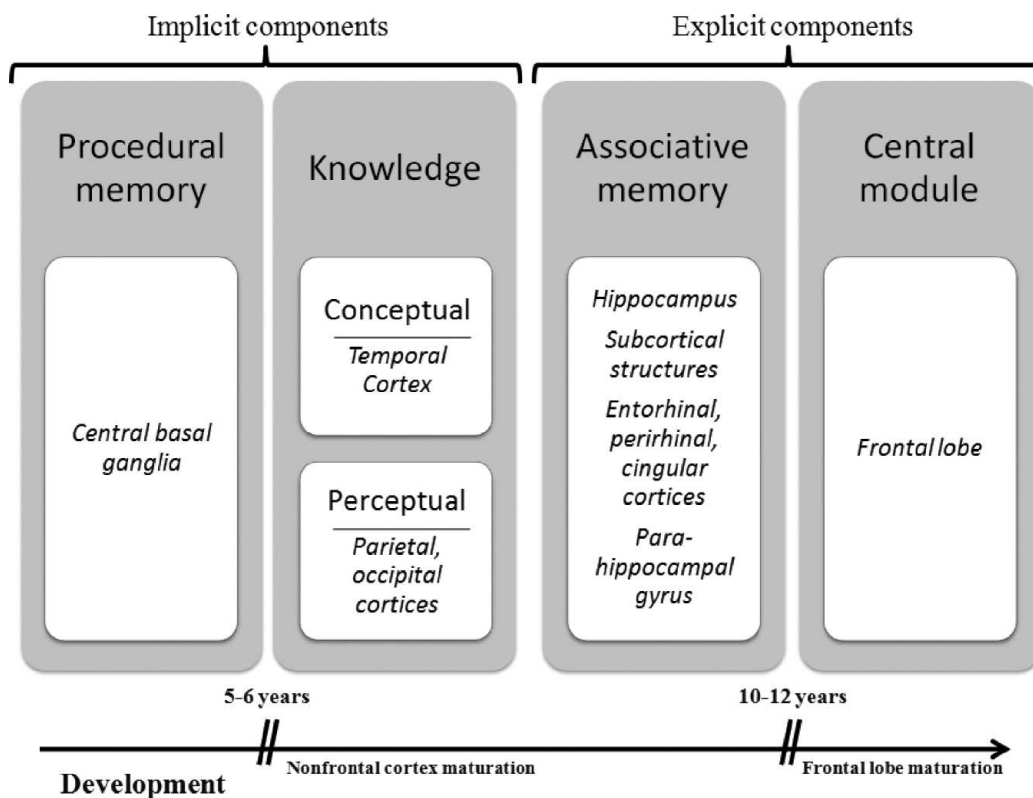
For the *memory system view*, the two explicit components (i.e., associative and working memory) develop progressively during childhood reflecting the late maturation of the frontal nervous system, which is almost matured in late childhood (around the age of 10–12 years old). In contrast, the two implicit components (i.e., procedural and knowledge memory) mature early as the result of the early maturation of the subcortical and posterior cortical nervous system (around the age of 2–3 years old; Anooshian, 1997; Mace, 2003; Weede, 2003). These developmental memory assumptions are then respectively advanced to account for the significant developmental differences observed in the explicit memory tests and the usual unchanged implicit memory performances across a wide age range (from the age of 3 to adulthood; Digiulio, Seidenberg, O'Leary, & Raz, 1994; Parkin, 1997; for a review, see Sherry & Schacter, 1987). Consequently, findings that reveal age-related differences on conceptual memory tests (Barry, 2007; Mecklenbräuker et al., 2003; Murphy et al., 2003; Perruchet et al., 1995) are problematic for the memory system view.

For this reason, Murphy et al. (2003) proposed a recent view called the *knowledge base hypothesis* in which the perceptual records and, thus, perceptual priming are a stable knowledge base during childhood (well established by 5 years of age); whereas conceptual records and, thus, conceptual priming are a developing knowledge base more specifically used to learn categorical relationships. Through an analytic examination of conceptual priming studies in children, these authors have identified that age-related differences

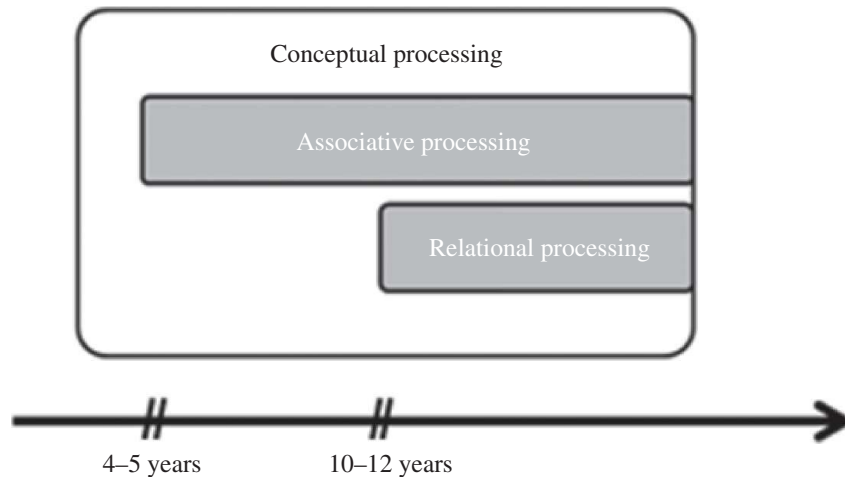
were obtained when the implicit test required unfamiliar categorical knowledge (using the Categorical Exemplars Generation [CEG] test; e.g., Perruchet et al., 1995), whereas no age differences were seen on the implicit tests based on familiar categorical knowledge (e.g., Anoshian, 1997) or associative knowledge (with the Free Association [FA] test; e.g., Mecklenbräuker et al., 2003; Parkin, 1997). To support this new hypothesis, Murphy et al. (2003) and her colleagues (Mecklenbräuker et al., 2003) studied several different age groups (5–7 years, 8–9 years, 10–13 years, 17–37 years) in order to demonstrate that age differences occurred on the CEG test with atypical exemplars (i.e., developing knowledge) whereas no differences were observed on the FA test with typical exemplars (i.e., stable knowledge).

It can be noted that the *knowledge base hypothesis* is in accordance with the two separate parts of the knowledge memory component in the memory system by Moscovitch (1992, 2008), where the neuroanatomical basis is different for the conceptual records (i.e., the temporal cortex) and perceptual records (i.e., the more posterior sensory cortex). Figure 1 illustrates the *memory system view* and its application in the memory development area.

In the *processing view*, conceptual processing (including its implicit or explicit activation) matures later than perceptual processing, as the result of the functional development from the posterior to the anterior cortical areas (Challis, Velichkovsky, & Craik, 1996; Deacon, 1996; Goldberg, 1989; Perez et al., 1998). These developmental processing assumptions are then made to account for the developmental differences observed in both implicit and explicit conceptual tasks (Perez et al., 1998; Perruchet et al., 1995) and the usual unchanged perceptual priming performances across a wide age range (from the age of 3 years to adulthood; Parkin, 1997; Russo, Nichelli, Gibertoni, & Cornia, 1995;



**Figure 1** Memory development according to the *memory system view* (adapted from Moscovitch, 1992).



**Figure 2** Memory development according to the processing view.

Schneider, 2000) (Figure 2). However, findings that reveal no age-related differences in conceptual priming are problematic for this view and, as of yet, an integrative processing explanation has not been proposed.

### **THEORETICAL EXTENSION OF THE PROCESSING VIEW: MULTIPLE CONCEPTUAL PRIMING**

More recently, within the processing view, several theoretical approaches have been proposed for conceptual priming. Several studies on young adults have provided evidence that the mechanisms of conceptual priming are not unitary but are multiple (Cabeza, 1994; Mulligan, 1996, 2002; Mulligan, Guyer, & Beland, 1999; Vaidya et al., 1997; Weldon & Coyote, 1996). Cabeza (1994) showed that in implicit measures, the priming scores in the CEG task were promoted after the subjects were given an encoding instruction orienting them to categorize the items, compared to an instruction orienting the subject to treat each item separately (i.e., a word production according to an associative relation). Conversely, on the FA test, the priming scores were improved by an “associative relation” instruction, compared to a “sharing” instruction. For Cabeza (1994), this is the evidence of two separate conceptual priming mechanisms: associative priming processes (corresponding to a converging activation within the semantic networks, as in the case of the associative relations required in the FA tests) and relational priming processes (corresponding to a spreading semantic activation within the semantic network, as in the case of categorical relations evaluated in the CEG tests, for example). These findings support the conceptual priming distinction view. For the CEG tests, manipulations that rendered the categorical structure of the study list more or less salient affected the categorical-relational encoding, and, thus, priming. For instance, blocking studied exemplars by category under a semantic encoding condition increased priming (Blaxton, 1992; McDermott & Roediger, 1996; Mulligan et al., 1999; Rappold & Hashtroudi, 1991). The assumption of multiple conceptual priming may have provided a better understanding of the discrepant results for the age development effect on the two conceptual priming tests. Anooshian (1997) and Perez et al. (1998) used the FA test and reported that there was no age effect, whereas studies using the CEG tests reported an age effect (Barry, 2007; Mecklenbräuker et al., 2003; Murphy et al., 2003; Perruchet et al., 1995). Therefore, the following *developmental*

*conceptual priming hypothesis* could be proposed: During childhood, associative conceptual priming processes are established earlier (at approximately 4–5 years of age) than relational processes (at approximately 11–12 years of age). This hypothesis is supported by the well-known preference of younger children (from 6 to 10 years old) for associative links (e.g., monkey-banana; rabbit-carrot) compared to categorical links (e.g., Animals [monkey, rabbit]; Fruit-vegetables [banana, carrot]); whereas older children (12–13 years old) and adults have a preference for categorical links (Bjorklund & de Marchena, 1984). Thus, even when younger children are familiar with the category relationships, the strength or richness of the categorical links between the items increases with age, in comparison with the strength of the associative links. Bjorklund (1985) proposed that the impact of development on the strength or richness of different semantic links affects the automatic activation of these links in memory tasks. Similarly, and by extent, the differential development of multiple conceptual priming mechanisms could also corroborate the recent finding provided by Gogtay et al. (2004) revealing that the temporal cortex matures later (over the age of 15). Therefore, findings that do not reveal age-related differences in conceptual priming might not be as problematic as thought in light of the new extensions of the processing view. Furthermore, this hypothesis may also integrate the findings from the *knowledge base hypothesis* but may additionally explain why the priming performance on FA tests remain largely stable with age, while it increases with age on CEG tests.

Based on the overall available data, the present study aimed to investigate the *multiple conceptual priming hypothesis* in memory development. To this end, two experiments were designed to systematically explore three age groups: 7–9 years old, 10–12 years old, and 13 years and older). For all of the experiments, the items used in the memory tests were selected according to age-appropriate category production norms (from French data: Catach, 1984; Ehlich, Bramaud du Boucheron, & Florin, 1978; Ferrand & Alario, 1998; Ters, Mayer, & Reichenback, 1995) in order to avoid developmental improvement in the category knowledge (as proposed in the knowledge base hypothesis). Consequently, for the CEG test, all of the manipulations must only affect the primed items and not the unprimed item (i.e., the unstudied items).

## EXPERIMENT 1

The aim of Experiment 1 was to examine age differences in the two conceptual priming tests (FA vs. CEG) and their explicit counterparts (i.e., associative word-cued recall vs. category-cued recall, respectively). The main expected result was to observe an age effect in the priming score on the CEG test but not in the FA test. In contrast, we expected age differences in both of the explicit memory tests.

### Method

**Participants.** Seventy-eight participants (37 girls and 41 boys) were selected and divided into three age groups: 7–9 years old ( $n = 26$ ); 10–12 years old ( $n = 26$ ); and 13 years and older (max. 16 years old) ( $n = 26$ ) (see Table 1). All of the participants were recruited in the public scholar establishments collaborating with the French teaching Academy in Limoges, France, which specializes in the training of secondary teachers (l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres). The participants were all volunteers and both their parents and the professorial team gave their permission for their involvement.

**Table 1** Experiment 1 — Demographic Data for Each Age Group for Experiment 1.

Age group	Gender (No. girls/boys)	Average age ( <i>SD</i> )
7–9	11/15	8.27 (0.91)
10–12	12/14	11.25 (0.81)
+13	14/12	15.03 (1.17)

All of the participants were native French speakers and did not present psycho-affective difficulties, school problems, or speech difficulties.

**Design.** All of the experiments reported in this article used two  $3 \times 2$  factorial (one for implicit measures and one for explicit measures) designs, with only independent measures for the age factor. The dependent variables were the percentage of absolute priming (i.e., the implicit test) or words recalled (i.e., the explicit test).

Overall, the calculated score for the implicit tests corresponded to the number of times the subject produced the target word once the cue was given to him/her during the test phase. Similarly, the unstudied condition corresponded to the number of times the subject produced words that had not been studied but, rather, fixed by the experimenter once the cue was given. A priming effect was inferred when the performances for the words previously studied were higher than those obtained when the words had not been presented before (i.e., the unstudied condition; Murphy, McKone, & Slee, 2006). More precisely, for each implicit test, two item lists of 10 items (i.e., studied vs. unstudied items) were used and counterbalanced from one subject to another, such that each list served for both a study list (i.e., target) and an unstudied list equally often at tests. The calculation of the priming in absolute terms (i.e., “studied items minus unstudied items”) was chosen as recommended by Murphy et al. (2006) in the case of children.

Experiment 1 consisted of four experimental conditions: (a) an associative orienting unintentional study with an implicit FA test, (b) an associative orienting intentional study with an explicit associative word-cued recall test, (c) a relational orienting unintentional study with an implicit CEG test, and (d) a relational orienting intentional study/category-cued recall explicit test.

**Materials and Procedure.** A total of 100 words were used in Experiment 1. These words were concrete words selected from lexical databases made for primary school children (Ehrlich et al., 1978; Ters et al., 1995). The word frequency and verbal association frequencies in the French language (Catach, 1984; Ferrand & Alario, 1998) were both controlled and familiar to the children 7–8 years old (i.e., the youngest children tested). The categories necessary for the CEG tests were also selected with the younger children in mind (Bjorklund, 1988; Bjorklund, Coyle, & Gaultney, 1992). The categories were carefully chosen to be familiar even to the youngest group (Ehrlich et al., 1978; Ters et al., 1995). The following categories were used: toys, animals, flowers, dwellings, clothing, tools, transportation, parts of a tree, classroom objects, and household appliances. Furthermore, there were no obvious associative relationships between the targets and cues or between targets from the same category.

The word set was used as follows: 60 words were chosen for the two implicit tests and the 40 remaining words were used in the explicit tests. For each implicit test, 30 words were divided again into two sets of 10 words (A and B) counterbalanced across participants

with respect to a primed or unstudied status. The remaining 10 words were used as filler items. For the FA test, the selected words were unrelated, while in the CEG test they were categorically related with five items per category. The targets were presented in a quasi-random order with no more than two targets from the same category in adjacent positions. Similarly, in the explicit versions, 20 unrelated words composed the associative word-cued recall test and 20 related words from four categories (five words per category) composed the category-cued recall test.

All of the participants were tested individually in a quiet room at their school during a single session. They were told that they were going to play several word games. In the beginning of the testing, subsequent memory tests were not mentioned, constituting an unintentional learning condition for the two implicit tests that are performed before the explicit memory tests. Thus, the children have firstly performed the two implicit tests (i.e., the FA and CEG tests, which were counterbalanced across the participants), and then they performed the two explicit memory tests that were administrated with intentional learning instructions (i.e., associative word- and category-cued recall, which were also counterbalanced).

Regardless of the test, the material was presented orally, and, between the study phase of the material and the test phase, the subject performed a distractive task during 1 minute: a letter fluency task in which the participant had to produce as many words as possible that began with a given letter. The four tasks were performed as follows.

#### *Associative Orienting Unintentional Study with an Implicit FA Test.*

During the study phase, the subject was given a target word and was then asked to produce a word corresponding to the place where the target word could be found (e.g., “*garden*” for the target “*grass*”). The subject had 4 seconds to provide an answer and in the case of an incorrect or missing response, the experimenter supplied the correct one.<sup>1</sup> In order to familiarize the participants with the procedure, the same design as in the first experiment items that were not used in the experiment. During the test phase, 10 associative self-generated words from the target items were given as cues, mixed with 10 other words that were not presented beforehand and were not related with the studied items, with the instruction to “say the first word that comes to mind.”

*Associative Orienting Intentional Study with an Explicit Associative Word-cued Recall Test.* During the encoding phase, the subject was instructed to retain 20 word targets and, for each one, to produce a semantic associate corresponding to the possible place of the target (4 seconds were allotted per answer; e.g., for the target “Clown,” the self-generated cue can be “Circus”). During the cued recall test, the self-generated cues were given as cues for a deliberated recall. The children were asked not to guess. The recall was terminated when a child said that he/she could not remember more items.

#### *Relational Orienting Unintentional Study with an Implicit CEG Test.*

During the study phase, the subject was instructed to self-generate the category name for each exemplar (20 exemplars with five per category) and to sort the exemplars by category (he/she was given 4 seconds per exemplar). In order to familiarize the subjects with the

<sup>1</sup>However, all the children have well self-generated a cue, and all the cues self-generated were answers matching a correct possible place. It can be noted that only 3% of the children’s answers were indirect places (e.g., Dishes-target — Faucet was self-generated).

procedure, they were given two practice trials with exemplars from two categories not used in the experiment. In the test phase, two self-generated names of the four studied categories and two names of the unstudied categories were announced by the experimenter, one at a time. The ordering was random, with the constraint that the first category was to be an unstudied one and the category names were to be alternated with respect to the studied and unstudied status. The children were asked to produce 10 exemplars for each category name. Ten exemplars were required to increase the likelihood that the participants would produce instances other than the most common ones (Graf, Shimamura, & Squire, 1985).

*Relational Orienting Intentional Study/Category-cued Recall Explicit Test.* During the encoding phase, each subject was instructed to retain 20 related words (mixed in four categories of five exemplars) and, for each one, to self-generate the category name and then to sort them according to the categorical relationships. During the cued recall, the four self-generated category names were given as cues. The children were asked not to guess. The recall was terminated when a child said that he/she could not remember any more items.

## Results

The results are divided into two sections (below). The first section provides evidence for the priming effect on participants for both of the implicit tasks, as well as evidence that the associative and category knowledge required for these tests was acquired in the youngest as well as the oldest children. This methodological precaution was carried out in order to avoid the impact of the development of knowledge on the data collected, as previously demonstrated by Murphy et al. (2003) and her colleagues (Mecklenbräuker et al., 2003) in the context of the knowledge base hypothesis.

The second section presents results pertaining to the main aim of the present experiment, that is, examining age differences in the two conceptual priming tests (i.e., the FA test vs. the CEG test) and in their explicit counterparts (i.e., associative word-cued recall vs. category-cued recall).

In all of the cases, post hoc comparisons were performed using Fisher's procedure with  $\alpha = .05$ .

**Priming Effect and Unstudied Condition Measures.** For all of the data from each FA or CEG tests, we performed a mixed ANOVA analysis, 3 (Age)  $\times$  2 (Item status: studied vs. unstudied) with independent measures for the age factor. The main results showed: (a) For FA tests, a significant effect of the item status factor (the performances for the studied items were much higher than those for the unstudied performances,  $F(1, 75) = 53.42$ ,  $p < .0001$ , but no significant age effect ( $p > .600$ ) and nonsignificant interaction effect ( $p > .900$ ); (b) For the CEG tests, all the effects were significant with age,  $F(2, 75) = 6.26$ ;  $p < .01$ , item status,  $F(1, 75) = 168.97$ ,  $p < .0001$ , two-ways interaction,  $F(2, 75) = 4.53$ ,  $p < .02$ . For this interaction effect, partial analyses revealed no age difference in unstudied condition ( $p > .800$ ), while age differences occurred in studied condition,  $F(2, 75) = 11.08$ ,  $p < .0001$ , where the two youngest groups (7–9 years old and 10–12 years old) performed lower than the oldest one ( $\geq 13$  years old) according to the Fisher procedure.

As seen above, when no age difference is obtained on an unstudied condition, it is possible to calculate the absolute priming scores (Murphy et al., 2006; see Table 2).

**Table 2** Experiment 1 — Priming Effect on FA and CEG tests for the Three Age Groups.

	Studied Items ( <i>SD</i> )	Unstudied Items ( <i>SD</i> )	Priming ( <i>SD</i> )
Associative test	.15 (0.13)	.05 (0.06)	.11 (0.11)
7–9 years	.14 (0.10)	.05 (0.07)	.10 (0.09)
10–12 years	.17 (0.13)	.07 (0.06)	.10 (0.12)
+13 years	.15 (0.15)	.06 (0.06)	.11 (0.11)
Relational test	.48 (0.13)	.25 (0.11)	.24 (0.16)
7–9 years	.44 (0.11)	.24 (0.10)	.20 (0.14)
10–12 years	.45 (0.11)	.25 (0.12)	.20 (0.16)
+13 years	.57 (0.12)	.25 (0.12)	.31 (0.15)

**Age Differences in Explicit and Implicit Performances.** The percentage of priming in absolute terms was analyzed with a mixed ANOVA 3 (Age)  $\times$  2 (Test: Associative vs. Relational) and cued recall performances (Table 3) too.

**Explicit Measure.** The analysis revealed the following main effects: age,  $F(2, 75) = 11.21, p < .0001$ ; test,  $F(1, 75) = 38.99, p < .0001$ . The two-way interaction was significant,  $F(2, 75) = 3.97, p < .03$ , indicating that the age effect was different according to the type of test.

The post hoc tests (Figure 3) showed age differences were observed in the two *explicit* cued recall measures, but they were more pronounced in the associative-cued recall task compared to the category-cued recall task.

**Implicit Measure.** The analysis revealed the following main effects: age,  $F(2, 75) = 3.85, p < .03$ ; test,  $F(1, 75) = 42.37, p < .0001$ . The two-way interaction was significant,  $F(2, 75) = 3.65, p < .04$ , indicating that the age effect was different according to the type of test.

Confirming the previous results, the post hoc tests (Figure 4) revealed an age effect on the priming score from the CEG test but not the FA test. More precisely, on the CEG test, the two youngest groups (i.e., aged 7–9 and 10–12) performed lower than the oldest group (i.e., aged 13 and older).

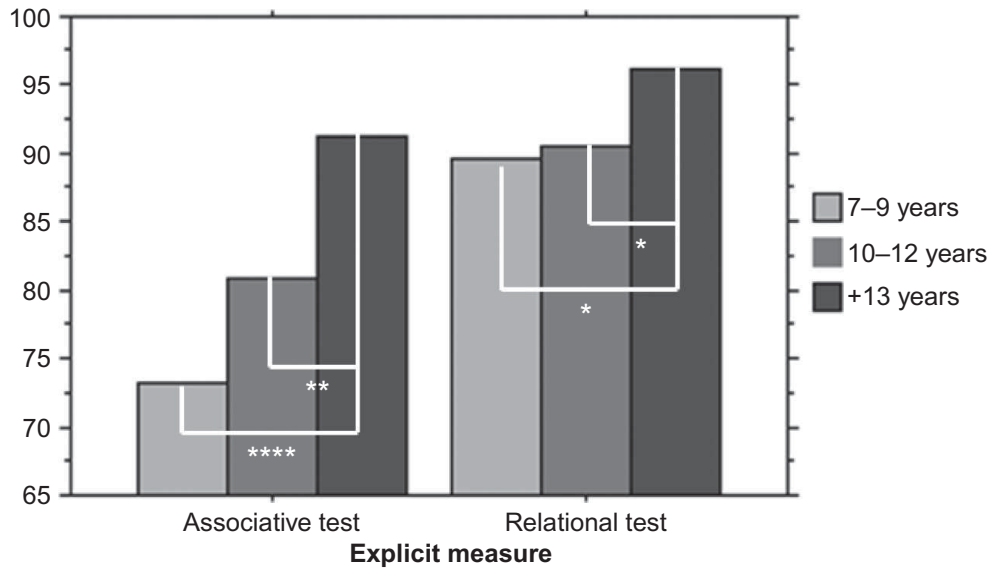
## Discussion

With respect to the implicit measures, age differences were observed only on the CEG test, with a clear improvement for the participants aged 13–16 years old. Conversely, for the explicit measures, differences were observed in all of the tests; however, they were

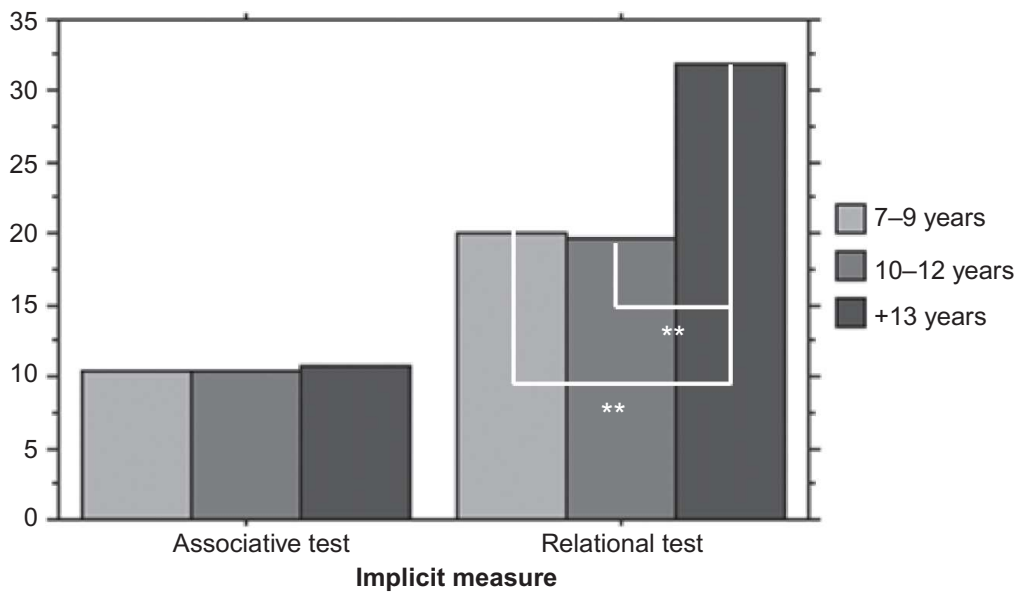
**Table 3** Experiment 1— Percentage of Recalled Items According to the Type of Test for Each Age Group.

	Explicit Measure	
	Associative Test ( <i>SD</i> )	Relational Test ( <i>SD</i> )
7–9 years	.73 (0.20)	.90 (0.11)
10–12 years	.81 (0.13)	.91 (0.11)
+13 years	.91 (0.07)	.96 (0.05)





**Figure 3** Experiment 1— Graphic representation of the percentage of recalled items according to the type of test for each age group. \* = Significant for the Fisher procedure ( $*p < .05$ ;  $**p < .01$ ;  $***p < .001$ ;  $****p < .0001$ ).



**Figure 4** Experiment 1— Graphic representation of the percentage of primed items according to the type of test for each age group. \* = Significant for the Fisher procedure ( $*p < .05$ ;  $**p < .01$ ;  $***p < .001$ ;  $****p < .0001$ ).

more marked for the associative-cued recall test compared to the category-cued recall test. These results support previous works showing overall age differences on the explicit tests (Schneider, 2000) and a discrepant age effect in implicit measures, where the FA tests were stable and the CEG tests improved during childhood (Barry, 2007; Mecklenbräuker et al., 2003; Murphy et al., 2003; Perez et al., 1998; Perruchet et al., 1995).

*The memory system view* is insufficient to explain the age differences in the conceptual implicit tests reported here or in other developmental studies (Mecklenbräuker et al., 2003; Murphy et al., 2003). Indeed, we observed an age effect on the CEG test in the implicit measure, which is not expected in the *memory system view*, where implicit memory is unchanged with age. Furthermore, a contamination of the implicit performances by

explicit strategies of recovery is unlikely because if that were the case, then the FA implicit tests would have also been contaminated (Coyle & Bjorklund, 1997; McKone & Slee, 1997; Parker, Dagnall, & Coyle, 2007). In conceptual implicit tests, the use of explicit strategy of recovery is related to the metacognitive subjects' capacities to judge and to establish relationships between the study and the retrieval phase, and then to implement a deliberate recollection during the test phase (Mecklenbräuker et al., 2003; Parker et al., 2007). Consequently, if children over 13 years are able to implement such explicit strategies in the implicit CEG test as well as in the explicit associative-word-cued recall test, then why do they become unable to on the FA test? In other words, in the logic of explicit contamination, the age-related differences observed in the associative-cued recall should be also occurred in the FA test, but it was not the case. It could be add that the higher number of studied cues in FA test (i.e., 10) compared to CEG test (i.e., two) is logically more conducive to the discovery of study-test links. So, this does not support the possible view by which relational processes involved in the CEG test are more incline to explicit strategy contaminations than associative processes.

Similarly, the recent extension of the memory system view by the *knowledge base hypothesis* cannot be advanced to explain the age differences observed in the CEG implicit test. Indeed, the typicality and familiarity of the items were controlled in order to build lists adapted to the youngest age group (Catach, 1984; Ehrlich et al., 1978; Ferrand & Alario, 1998; Ters et al., 1995). This is well supported by the fact that the unstudied items were not affected by the age variable. Thus, the age differences on the CEG test cannot be related to a lack of knowledge base in the two youngest groups.

Consequently, these data fit better with the *processing view*, in which exists multiple mechanisms of conceptual priming, where, for example, associative priming and relational priming are distinguished (Cabeza, 1994; Vaidya et al., 1997; Weldon & Coyote, 1996). According to this view, each type of conceptual priming may be assumed to have a different developmental trajectory: Associative priming is stable earlier during childhood than relational priming. In other words, associative conceptual processes may be established earlier (before the age of 7–9 years) compared to relational conceptual processes (after 13 years of age).

To support this assumption, Experiment 2 was carried out to better investigate the developmental effect on associative and relational priming, respectively, based on manipulations well known to influence them. Therefore, Experiment 2 focused on the effect of age on relational conceptual priming according to the blocked/unblocked manipulation.

## EXPERIMENT 2

To support our findings in Experiment 1, where age differences were obtained on the CEG tests, Experiment 2 examined the age differences on the CEG test according to the blocking manipulation (i.e., an unblocked vs. blocked condition). Indeed, for CEG tests in young adults, manipulations that render the categorical structure of the study list more salient affect relational encoding and, thus, increase priming. The blocking by category of studied exemplars increases priming compared to an unblocked condition and this, principally for the oldest group which have strong relational links (Blaxton, 1992; McDermott & Roediger, 1996; Mulligan et al., 1999; Rappold & Hashtroudi, 1991).

The main expected result was an age effect on the priming score from the CEG tests.

## Method

**Participants.** Participants were divided into three age groups: 7–9 years old ( $n = 26$ ); 10–12 years old ( $n = 26$ ); 13 years old and older ( $n = 26$ ). The same selection criteria used in Experiments 1 and 2 were also used here (Table 4).

**Design.** We used the same design as in the first experiment: 3 (Age)  $\times$  2 (Test) factorial design for each type of measure, with only independent measures for the age factor and identical methods of performance calculation (as in Experiment 1).

Experiment 2 consisted of four experimental conditions: (a) a relational orienting unintentional study on an unblocked list with an implicit CEG test, (b) a relational orienting intentional study on an unblocked list with category-cued recall explicit test, (c) a relational orienting unintentional study on a blocked list with an implicit CEG test, and (d) a relational orienting intentional study on a blocked list with a category-cued recall explicit test.

**Materials and Procedure.** The same material criteria and procedure for the relational tests (CEG and category-cued recall) used in Experiment 1 were applied in this experiment. A total of 100 words were used: 50 words for the two tests (i.e., CEG and category-cued recall) used under the blocked exemplars condition and the other 50 words for unblocked exemplars condition. The words used under the unblocked conditions were the same as those used in Experiment 1. The words used for the blocked conditions were also concrete exemplars from 10 categories (six for the CEG test and four for the category-cued recall test): car components, toiletry set, food, weapons, furniture, musical instruments, rooms, weather forecast, body parts, and sports equipment.

Under the *blocked exemplars condition of the CEG test*, during the study phase, the subject was instructed to self-generate the category name for each exemplar blocked per category (five exemplars per category) and to sort them (he/she was given 4 seconds per exemplar). In the test phase, two self-generated names of the four studied categories and two names of the unstudied categories were announced by the experimenter, one at a time. The ordering was random with the constraint that the first category was to be an unstudied one and the category names were to be alternated with respect to the studied and unstudied status. The children were asked to produce 10 exemplars for each category name. Under the *blocked exemplars of category-cued recall test*, during the encoding phase, the subject was instructed to retain 20 related words (blocked in four categories of five exemplars) and for each one, to self-generate the category name and to sort them according to the categorical relationships. During the cued-recall test, the four self-generated category names were given as cues. The children were asked not to guess. The recall was terminated when a child said he/she could not remember any more items.

**Table 4** Experiment 2 — Demographic Data for Each Age Group for Experiment 2.

Age Group	Gender (No. girls/boys)	Average age ( <i>SD</i> )
7–9	13/13	8.35 (0.87)
10–12	14/12	11.43 (0.93)
+13	11/15	14.91 (0.97)

The two implicit tests were administered first to each participant followed by the two explicit tests. Within each type of memory measure (i.e., implicit vs. explicit), the unblocked and blocked conditions were counterbalanced across the participants.

## Results

The results are divided into two sections. The first section provides evidence for both priming effect and the mastery of categorical knowledge required for these tests in participants. The second section addresses the age differences in the results according to the blocking effect. In all of the cases, the post hoc comparisons were again performed using Fisher's procedure with  $\alpha = .05$ .

**Priming Effect and Unstudied Condition Measures.** For all of the data from each unblocked and blocked condition, we performed a mixed ANOVA 3 (Age)  $\times$  2 (Item status: studied vs. unstudied) analysis. The main results showed: (a) For unblocked tests, the simple effects are significant with age,  $F(2, 75) = 5.21, p < .01$ , the item status,  $F(1, 75) = 99.33, p < .0001$ ; the two-ways interaction is not significant,  $F(2, 75) = 1.76, p > .05$ .

Despite the nonsignificant interaction effect, partial analyses are realized and showed an age effect under the studied condition,  $F(2, 75) = 17.02, p < .0001$ , where the two younger groups performed worse than the oldest one, and no age effect under the unstudied condition,  $F(2, 75) = 1.08, p > .05$ ; (b) For the blocked tests, all the effects are significant, with age,  $F(2, 75) = 5.21; p < .001$ , item status,  $F(1, 75) = 175.64; p < .0001$ , and two-way interaction,  $F(2, 75) = 12.002, p < .0001$ . For this interaction effect, the post hoc tests revealed no age difference in the unstudied condition ( $p > .100$ ), while age differences occurred in the studied condition,  $F(2, 75) = 4.69, p < .05$ , where the 7- to 9-year-old group performed worse than the oldest one ( $\geq 13$  years old) according to the Fisher procedure.

The priming effect on both of the implicit tests occurred for all of the age groups. As seen above, the absolute priming scores were then calculated (Table 5).

**Age Differences in Explicit and Implicit Performances.** The percentage of priming in absolute terms (Table 6) was analyzed with a mixed ANOVA 3 (Age)  $\times$  2 (Test: unblocked list vs. blocked list) and cued-recall performances too.

**Table 5** Experiment 2 — Priming Effect on CEG Test in the Unblocked and Blocked Conditions for the Three Age Groups.

	Studied Items ( <i>SD</i> )	Unstudied Items ( <i>SD</i> )	Priming ( <i>SD</i> )
Unblocked	.48 (0.16)	.26 (0.13)	.23 (0.13)
7–9 years	.41 (0.16)	.22 (0.14)	.21 (0.18)
10–12 years	.48 (0.16)	.29 (0.12)	.20 (0.18)
+13 years	.54 (0.13)	.26 (0.12)	.29 (0.19)
Blocked	.53 (0.15)	.27 (0.12)	.27 (0.19)
7–9 years	.46 (0.13)	.27 (0.12)	.20 (0.17)
10–12 years	.50 (0.14)	.30 (0.12)	.22 (0.16)
+13 years	.66 (0.11)	.25 (0.11)	.40 (0.16)

**Table 6** Experiment 2 — Percentage of Recalled Items According to the Type of Test for Each Age Group.

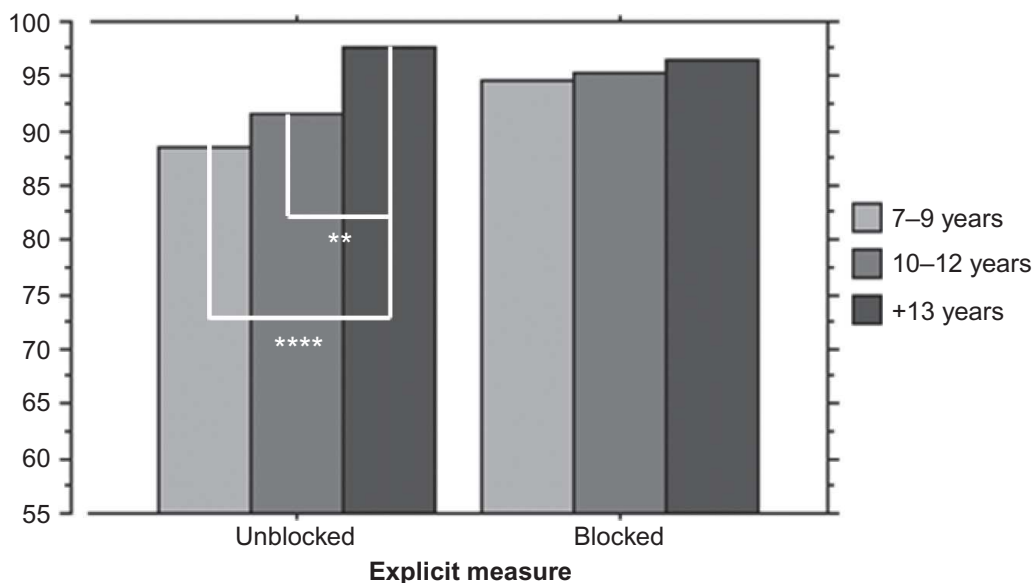
	Explicit Measure	
	Unblocked ( <i>SD</i> )	Blocked ( <i>SD</i> )
7–9 years	.89 (0.11)	.95 (0.06)
10–12 years	.92 (0.08)	.95 (0.07)
+13 years	.97 (0.03)	.97 (0.06)

**Explicit Measure.** The analysis revealed the following main effects: age,  $F(2, 75) = 6.40$ ,  $p < .01$ , test,  $F(1, 75) = 10.46$ ,  $p < .01$ . The two-way interaction was significant,  $F(2, 75) = 5.44$ ,  $p < .01$ , indicating that the age effect was different according to the type of test.

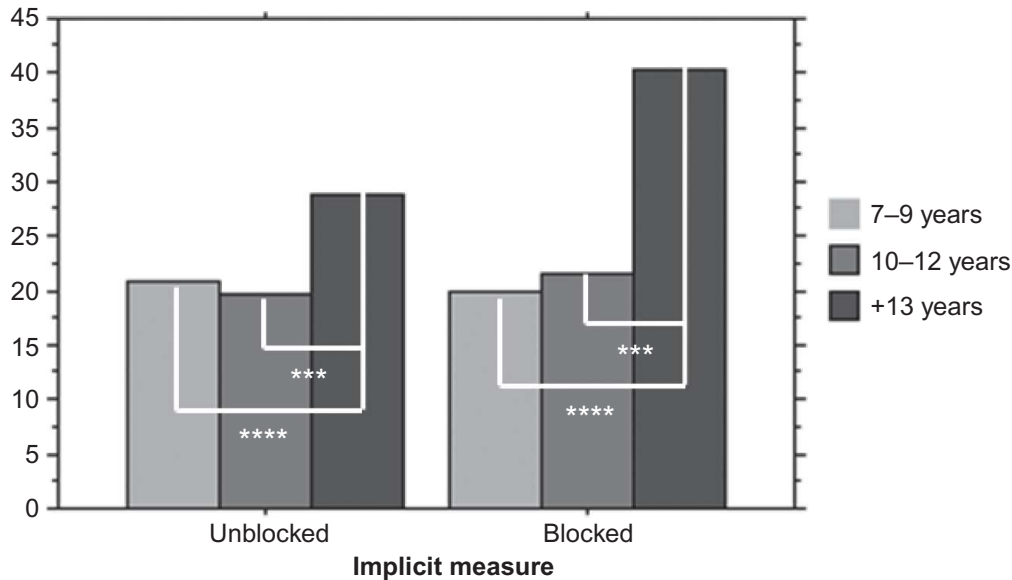
The post hoc tests (Figure 5) showed age differences in the two cued-recall measures, but they were more pronounced in the unblocked condition compared to the blocked test condition. Under the unblocked condition, the two youngest groups performed worse than the oldest one, while under the blocked condition the age group differences did not reach the significance.

**Implicit Measure.** The analysis yielded only a main effect of age,  $F(2, 75) = 11.34$ ;  $p < .0001$ , test,  $F(1, 75) = 2.35$ ,  $p > .100$ , “Age  $\times$  Test,”  $F(2, 75) = 1.83$ ,  $p > .100$ . The post hoc tests (Figure 6) reveal that the 7–9 age group as well as the 10–12 age group performed lower than the oldest one (13 years and more).

Despite the nonsignificant interaction effect, partial analyses for the “test” factor reveal that a blocking effect occurred for the 13 and older age group,  $t(25) = 4.25$ ,  $p < .05$ , but not for the two youngest groups ( $p > .800$  and  $p > .600$ , respectively).



**Figure 5** Experiment 2 — Graphic representation of the percentage of recalled items according to the type of test for each age group. \* = Significant for the Fisher procedure ( $*p < .05$ ;  $**p < .01$ ;  $***p < .001$ ;  $****p < .0001$ ).



**Figure 6** Experiment 2—Graphic representation of the percentage of primed items according to the type of test for each age group. \* = Significant for the Fisher procedure ( $*p < .05$ ,  $**p < .01$ ,  $***p < .001$ ,  $****p < .0001$ ).

## Discussion

These results confirmed those of Experiment 1 showing that similar age differences occurred on the CEG and category-cued recall tests.

In addition, the manipulation of unblocked-blocked list provides different results depending on the implicit/explicit measures. On the explicit measures, the two youngest groups performed less well than the oldest one, and they benefited also more from the blocking effect.

On the implicit measures, we observed a significant improvement in the CEG scores in the oldest children (13 years old and older) and a significant blocking effect in this age group. In other words, for the two other groups, the CEG scores were low and the blocking effect was not observed.

The fact that we observed the blocking effect in both of the memory measures (i.e., the CEG and category-cued recall tests) is in agreement with the literature on the *processing view*, which predicted that a manipulation rendering the categorical structure of the list more salient would affect the relational encoding processes and then would increase memory performances for the implicit as well for explicit measures (e.g., Einstein & Hunt, 1980; Rappold & Hashtroudi, 1991). However, even if the category-cued recall data likely suffered from a ceiling effect, age differences are reduced with a blocked condition. This did not mirror the age differences obtained for the implicit measures, where the blocked condition did not permit the reduction of the age differences.

Furthermore, as the unblocked and blocked conditions were counterbalanced across the participants, we performed complementary ANOVA analyses on CEG priming scores including age, blocked/unblocked variables, and the blocked/unblocked order factor. And, the results showed that the order of blocked/unblocked conditions has no effect on CEG priming score ( $p > .900$ ), and the interaction effects are also not significant as follows: Order  $\times$  Age ( $p > .900$ ); Order  $\times$  Blocked/Unblocked ( $p > .900$ ); Age  $\times$  Order  $\times$  Blocked/Unblocked ( $p > .900$ ). So, this indicates that the order of blocked and unblocked conditions has not induced in the oldest children the understanding of

relationships between the study and tests conditions (particularly, when the blocked condition came first). This is not in favor of the assumption of the use of an explicit strategy of recovery in the oldest children to account for their high CEG priming scores.

Thus, as a result, the relational priming scores as well as category-cued recall scores increased with age. In addition, the blocking effect reduced the age differences only under explicit measure condition: Under an unblocked condition, age differences occurred between the two youngest groups and the oldest one, while under a blocked condition, age differences were suppressed.

## GENERAL DISCUSSION

In the present study, we investigated the development of conceptual priming in childhood in light of the *multiple conceptual priming hypothesis of the processing view*. The main results showed that (a) the associative priming was unchanged from 7–9 to 16 years old while the relational priming improved for the oldest group (13–16 years old) (Experiment 1); (b) the age differences on relational priming still occurred under the unblocked condition and under the blocked condition while the age differences on explicit measures are cancelled under the blocked condition compared to the unblocked condition. In addition, the blocking effect on relational priming occurred only on the oldest group.

### Differential Age Effect on Conceptual Priming: Support for the Processing View?

As previously discussed, the *memory system view* cannot fully account for the age differences observed in relational priming. Indeed, explanations in terms of contamination by explicit memory processes as well as the developing of the knowledge base appear to be insufficient. Thus, what remains is to examine whether the alternative *processing view* provides a more relevant account of the age differences seen in the test, and notably the recent *hypothesis of multiple conceptual priming*.

For recall, among the *multiple conceptual priming hypotheses*, Cabeza (1994) distinguishes two separate conceptual priming mechanisms: the associative priming processes (corresponding to activations within the semantic networks of associative relations, as required in the FA tests) and the relational priming processes (corresponding to the semantic activation of categorical relations, as evaluated in the CEG tests, for example). As seen before, we designed two experiments investigating age differences on FA and CEG tests. Age differences were reported for the CEG tasks (Experiments 1 and 2) but not for the FA task (Experiment 1). In other words, according to the conceptual priming distinction by Cabeza, associative conceptual processes could be established earlier (i.e., younger than 7–9 years old) than the relational process (over 13 years old) during childhood.

In the CEG task, the priming scores were enhanced by the blocking effect only for the children aged 13 years and more. This result also revealed that, in older children, manipulations rendering the categorical structure of the study list more salient affect relational encoding, thereby boosting relational priming.

Taken together, these results support our *developmental hypothesis on multiple conceptual priming* where the associative conceptual priming processes are established earlier (at approximately 4–5 years of age) than the relational conceptual priming processes (at approximately 11–12 years) during childhood. As mentioned previously in the introduction section, the age differences observed in the two forms of conceptual priming were

consistent with the well-known preference of younger children (from 6 to 10 years old) for associative links compared to categorical links, while older children (12–13 years of age) and adults have a preference for the categorical links (Bjorklund & de Marchena, 1984). Thus, even when younger children are familiar with the category relationships, the strength or richness of the categorical links between items increases with age, in comparison to associative links. Bjorklund (1985, 2004) proposed that the impact of development on the strength or richness of different semantic links affects the automatic activation of these links in memory tasks. Our results seem to show, as we detailed before, that these links continue to strengthen after the children have attained 13 years of age. In other words, the age differences seen on the CEG tests may be the outcome of the late development of relational priming. The differential development of multiple conceptual priming mechanisms could also corroborate certain neurological findings. Recently, Gogtay et al. (2004) showed that the temporal cortex, mostly involved in conceptual processing, matures later (over 15 years of age). This may mirror the progressive increase with age of conceptual knowledge from associative to categorical relationships. The relationships between the temporal neocortex and conceptual priming are well documented since individuals with pervasive cortical damage, including damage to the medial temporal lobe, such as patients with Alzheimer's Disease (AD), demonstrate intact perceptual priming but an impaired or absent conceptual priming (Keane, Gabrieli, Fennema, Growdon, & Corkin, 1991; Monti, Gabrieli, Wilson, & Reminger, 1994; Salmon, Shimamura, Butters, & Smith, 1988). In addition to the evidence from individuals with AD suggesting that the temporal neocortex may be necessary to support conceptual priming, there is more direct evidence that an intact temporal cortex is necessary for normal conceptual implicit memory performance (Blaxton, 1992, 1996; Schacter & Buckner, 1998; Thompson-Schill, D'Esposito, & Kan, 1999; Wiggs & Martin, 1998).

In addition, the assumption of the late development of relational priming is also suggested in other research areas of child cognition. For example, numerous studies have addressed the counterintuitive developmental effect on false memories. In a general way, false memories correspond to errors of commission usually induced in laboratories by the Deese-Roediger-McDermott paradigm, or derived versions, which are typically designed in two steps (Deese, 1959; Roediger & McDermott, 1995). First, during the study phase, the participants are exposed to a list of words that are all highly associated or in categorical relationships, such that the words all converge to a single unrepresented word (e.g., sugar, candy, taste, nice, honey are associated to sweet). Second, during the memory test, the participants displayed a strong tendency to falsely recall or recognize the unrepresented common associate or the critical lure of the relevant category. Several child experiments have recently been published and they converge on the following pattern: false memory becomes more potent with age; the false recall of critical lures increases during childhood (e.g., Brainerd, Forrest, & Reyna, 2006). This age trend is observed with an associative list of words and a categorical list of words (i.e., all of the words on this list are NAMES OF ANIMALS; Howe, 2006). However, as demonstrated by Howe, the facilitation of relational processing at encoding on the categorical list (under blocked items compared to the unblocked condition) did not increase false recall in children aged from 5 to 11 years old, while the reduction of associative processing (under the pictorial-encoding compared to the word-encoding condition) decreased the rate of false recall in those children. These findings indicate that contrary to adults, where false memories can involve associative processes (as in DRM lists) as well as relational processes (as in a categorical list, Seamon, Luo, Schlegel, Greene, & Goldenberg, 2000), false memories in young children mainly



involve associative but not relational processes. Also, interestingly, several neuroimaging studies have shown that false memory is mostly mediated by the temporal lobe regions. More precisely, the anterior medial temporal lobe regions, which are mainly associated with the retrieval of semantic information, do not distinguish between true and false items that are strongly associated (e.g., Cabeza, Rao, Wagner, Mayer, & Schacter, 2000). Therefore, once again, the implication of the temporal lobe region in relational processing is pointed out. Consequently, the diminished role of relational processes in false recall by young children may be due to the late maturation of this region, as in the case of relational priming occurring in the CEG tests.

Thus, according to the *processing view*, the age differences observed in associative and relational conceptual priming may result from a differential growth of multiple conceptual priming mechanisms probably due to both knowledge development from associative to categorical links and increases in the automaticity of children's processing across their concept experiences.

### **Constant Age Effect on Conceptual Explicit Measures: Support for The Processing View?**

Age differences occurred in the explicit measures and were pronounced in both the associative-cued recall and the category-cued recall test. The development in explicit memory is well documented and is displayed in a large set of associative- or category-cued recall tasks (Anooshian, 1997; Kail, 1990; Murphy et al., 2003; Parkin, 1997; Perruchet et al., 1995; Sherry & Schacter, 1987).

More accurately, we observed that the associative-cued recall score increased progressively across the age groups. These observations are in accordance with previous child studies (e.g., Perez et al., 1998) that show a dramatically enhanced explicit measure with age on the associative-cued recall test. This is commonly linked to the development of mnemonic strategies that become more efficient with age as the result of the maturation of the frontal cortex (Flavell, 1971; Flavell, Miller, & Miller, 1993; Miller, 1990; for a review, see Bjorklund & Douglas, 1997). The implementation of a mnemonic strategy to memorize unrelated word lists may depend on the ability to elaborate each item deliberately, as suggested in the level-of-processing framework ( Craik, 2002; Craik & Lockhart, 1972).

Therefore, age differences observed in the associative-cued recall test are not due to differences in associative conceptual processes but are likely due to the late development of mnemonic strategies in childhood.

Similarly, the category-cued recall scores fully increased in the oldest children (over 13 years old; Experiments 1 & 2) except under the blocked condition, where the increase occurred earlier (i.e., from 7–9 years old; Experiment 2). Indeed, even if all of the children aged over 7 know categorical links, these links remain weaker to induce relational priming in the youngest groups (i.e., from 7 to 12 years old). With age, these categorical links may be enriched to induce relational priming (over the age of 13), with an intermediate state (for children aged over 7) during which recall scores increase when the study conditions promote a categorical encoding (i.e., blocking condition). With the age, children become more able to spontaneously use categorical relations to mediate recall (Bjorklund & de Marchena, 1984). These relationships become more automatic with the increase of concept experiences across childhood but are also influenced by children's memory strategies that become more controlled with age (O'Sullivan, 1996). As development continues, children progressively understand that categorical relationships influence performance. They

figure out how to exploit these relationships, and then they use their metamemory to implement and to drive organization strategy (Bjorklund, Muir-Broaddus, & Schneider, 1990; Howe, Brainerd, & Kingma, 1985; Howe & O'Sullivan, 1990). With regards to our results, children aged 13 and older clearly used the organization strategy to attain a high memory performance. By contrast, the children aged from 7 to 12 years old were only able to utilize categorical relationships to improve their recall in certain circumstances, for example, the salience of categorical relationships in a blocking condition. This revealed that, at this age, categorical relationships exist but are not spontaneously used yet. There are two possible explanations for this: weak categorical links in the semantic network and the failure of memory strategies. The weakness of categorical links could be explained by the delayed development of relational conceptual processes with respect to the late maturation of the temporal neocortex (as previously advanced for the CEG priming scores). This could provide an understanding of why a relational support (i.e., blocked material) facilitates the availability of categorical links in the children aged between 7 and 12 years old. Another explanation is related to the ability of these children to deliberately use categorical links as a mnemonic strategy. Indeed, the memory strategies might not be mature enough to implement categorical links as an organization strategy or again, the children were not fully aware that organizing material by dividing it into smaller, more manageable units is the best way to improve memory performance on a categorical word list. This latter assumption fits with previous results showing a gap in children between the moment when categorical knowledge is achieved and the moment when it is used as a cognitive strategy (Sauzéon, Lestage, Raboutet, N'Kaoua, & Claverie, 2004). Indeed, we observed that children aged 11–12 years old are able to access a large hierarchical category set (i.e., the number of categories sampled) on semantic fluency tests, but they only exploit them efficiently (i.e., the number of words per category) at a later stage (not before the age of 13).

The failure of the two youngest groups to use an organization strategy is consistent with cases of failure to use beneficial memory strategies seen in many cases of dysexecutive expression in normal aging (e.g., Taconnat et al., 2009; West & Thorn, 2001) or even in neuropsychological or psychiatric pathologies (e.g., Brebion, David, Pilowsky, & Jones, 2004). These cases of failure to use optimal memory strategies are similar in one important respect: They all involve impairment of the frontal lobe structures (Holthausen et al., 2003; Raz, 2000).

Thus, the age differences observed on the category-cued recall tests in children aged from 7 to over 13 years highlight the role of the late maturation of the temporal cortex in the development of relational conceptual processes as well as the role of the prefrontal cortex in the development of memory strategies across late childhood.

Therefore, the age-related differences observed in the associative-cued recall test may only depend on the development of memory strategies, while those observed in the category-cued recall test depend on the development of both relational conceptual processes and memory strategies. In other words, large age differences in the associative and relational explicit memory measures are not actually problematic for the *processing view*.

## CONCLUSION

This study reports a differential age effect on the implicit measures according to the distinction between associative and relational priming; thus supporting the *multiple conceptual priming hypothesis*, which is derived from the *processing view*. This differential effect is understood as the result of the progressive development of knowledge from

associative to categorical/relational links as well as an increase in the automaticity of children's processing across their concept experiences. In other words, although further investigations are again required, the *processing view* provides a viable account for the increase of relational priming during late childhood. In any case, it is particularly important to pursue the understanding of conceptual priming development since it is the base of numerous high-cognitive abilities, such as reading.

Original manuscript received February 15, 2010

Revised manuscript accepted January 18, 2011

First published online May 25, 2011

## REFERENCES

- Anooshian, L. J. (1997). Distinctions between implicit and explicit memory: Significance for understanding cognitive development. *International Journal of Behavioral Development, 21*, 453–478.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1999). Working Memory. In A. D. Baddeley (Eds.), *Essentials of human memory* (pp. 45–69). Hove, UK: Psychology Press.
- Barry, E. S. (2007). Does conceptual implicit memory develop? The role of processing demands. *Journal of Genetic Psychology, 168*(1), 19–36.
- Billingsley, R. L., Smith, M. L., & McAndrews, M. P. (2002). Developmental patterns in priming and familiarity in explicit recollection. *Journal of Experimental Child Psychology, 82*, 251–177.
- Bjorklund, D. F. (1985). The role of conceptual knowledge in the development of organization in children's memory. In C. J. Brainerd & M. Pressley (Eds.), *Basic processes in memory development: Progress in cognitive development research* (pp. 103–142). New York, NY: Springer-Verlag.
- Bjorklund, D. F. (1988). Acquiring a Mnemonic: Age and category knowledge effects. *Journal of Experimental Child Psychology, 45*(1), 71–87.
- Bjorklund, D. F. (2004). *Children's thinking: Developmental and individual differences* (4th ed.). Belmont, CA: Wadsworth/Thompson.
- Bjorklund, D. F., Coyle, T. R., & Gaultney, J. F. (1992). Developmental differences in the acquisition and maintenance of an organizational strategy: Evidence for the utilization deficiency hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology, 54*, 434–448.
- Bjorklund, D. F., & de Marchena, M. R. (1984). Developmental shifts in the basis of organization in memory: The role of associative versus categorical relatedness in children's free recall. *Child Development, 55*, 952–962.
- Bjorklund, D. F., & Douglas, R. N. (1997). The development of memory strategies. In N. Cowan (Ed.), *The development of memory in children* (pp. 201–246). Hove, UK: Psychology Press.
- Bjorklund, D., Muir-Broadus, J., & Schneider, W. (1990). The role of knowledge in the development of strategies. In D. Bjorklund (Ed.), *Children's strategies: Contemporary views of cognitive development* (pp. 93–128). New York, NY: Springer-Verlag.
- Blaxton, T. A. (1989). Investigating dissociations among memory measures: Support for a transfer-appropriate processing framework. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15*, 657–668.
- Blaxton, T. A. (1992). Dissociations among memory measures in memory-impaired subjects: Evidence for a processing account of memory. *Memory and Cognition, 20*, 549–562.
- Blaxton, T. A. (1996). Distinguishing false from true in human memory. *Neuron, 17*(2), 191–194.

- Brainerd, C. J., Forrest, T. J., & Reyna, V. F. (2006). Development of false-memory illusion. *Developmental psychology, 42*, 962–979.
- Brebion, G., David, A. S., Pilowsky, L. S., & Jones, H. (2004). Recognition of visual stimuli and memory for spatial context in schizophrenic patients and healthy volunteers. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 26*, 1093–1102.
- Cabeza, R. (1994). A dissociation between two implicit conceptual tests supports the distinction between types of conceptual processing. *Psychonomic Bulletin and Review, 1*, 505–508.
- Cabeza, R., Rao, S. M., Wagner, A. D., Mayer, A. R., & Schacter, D. L. (2000). Can medial temporal lobe regions distinguish true from false? An event-related functional MRI study of veridical and illusory recognition memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 98*, 4805–4810.
- Catach, N. (1984). *Les listes orthographiques de base du français (LOB)*. Paris, France: Editions Fernand Nathan.
- Challis, B. H., Velichkovsky, B. M., & Craik, F. I. M. (1996). Levels-of-processing effects on a variety of memory tests: New findings and theoretical implications. *Consciousness and Cognition, 5*, 142–164.
- Coyle, T. R., & Bjorkund, D. F. (1997). Age differences in, and consequences of, multiple- and variable-strategy use on a multitrial sort-recall task. *Child Development, 33*, 372–380.
- Craik, F. I. M. (2002). Levels of processing: Past, present . . . and future? *Memory, 10*, 305–318.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior, 11*, 671–684.
- Cycowicz, Y., Friedman, D., Snodgrass, J. G., & Rothstein, M. (2000). A developmental trajectory in implicit memory is revealed by picture fragment completion. *Memory, 8*, 19–35.
- Deacon, T. (1996). Prefrontal cortex and the high cost of symbolic learning: Why a brain capable of language evolved only once. In B. M. Velichkovsky & D. M. Rumbaugh (Eds.), *Communicating meaning: The evolution and development of language* (pp. 103–138). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of certain verbal intrusions in free recall. *Journal of Experimental Psychology, 58*, 17–22.
- Digiulio, V., Seidenberg, M., O'Leary, D. S., & Raz, N. (1994). Procedural and declarative memory: A developmental study. *Brain and Cognition, 25*(1), 79–91.
- Ehilich, S., Bramaud du Boucheron, G., & Florin, A. (1978). *Le développement des connaissances lexicales à l'école primaire*. Paris, France: PUF.
- Einstein, G. O., & Hunt, R. R. (1980). Level of processing and origination: Additive effects of individual item and relational processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 6*, 588–598.
- Ferrand, L., & Alario, F. X. (1998). Normes d'associations verbales pour 366 noms d'objets concrets. *L'Année Psychologique, 98*, 659–709.
- Flavell, J. H. (1971). First discussant's comments: What is memory development the development of? *Human Development, 14*, 272–278.
- Flavell, J. H., Miller, P. H., & Miller, S. A. (1993). *Cognitive development* (3rd ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Gabrieli, J. D. E., Fleischman, D. A., Keane, M. M., Reminger, S. L., & Morrell, F. (1995). Double dissociation between memory systems underlying explicit and implicit memory in the human brain. *American Psychological Society, 6*(2), 76–82.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101*, 8174–8179.
- Goldberg, E. (1989). Higher cortical functions in humans: The gradient approach. In E. Goldberg (Ed.), *Contemporary neuropsychology and the legacy of Luria* (pp. 229–276). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Graf, P., Shimamura, A. P., & Squire, L. R. (1985). Priming across modalities and priming across category levels: Extending the domain of preserved function in amnesia. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *11*, 386–396.
- Holthausen, E. A. E., Wiersma, D., Sitskoorn, M. M., Dingemans, P. M., Schene, A. H., & van den Bosch, R. J. (2003). Long-term memory deficits in schizophrenia: Primary or secondary dysfunction? *Neuropsychology*, *17*, 539–547.
- Howe, M. L. (2006). Developmentally invariant dissociations in children's true and false memories: Not all relatedness is created equal. *Child Development*, *77*, 1112–1123.
- Howe, M. L., Brainerd, C. J., & Kingma, J. (1985). Development of organization in recall: A stages-of-learning analysis. *Journal of Experimental Child Psychology*, *39*, 230–251.
- Howe, M. L., & O'Sullivan, J. T. (1990). The development of strategic memory: Coordinating knowledge, metamemory, and resources. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's strategies: Contemporary views of cognitive development* (pp. 129–155). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kail, R. V. (1990). *The development of memory in children*. New York, NY: Freeman.
- Keane, M. M., Gabrieli, J. D. E., Monti, L. A., Fleischman, D. A., Cantor, J. M., & Noland, J. S., (1997). Intact and impaired conceptual memory processes in amnesia. *Neuropsychology*, *11*(1), 59–69.
- Keane, M. M., Gabrieli, J. D., Fennema, A. C., Growdon, J. H., & Corkin, S. (1991). Evidence for a dissociation between perceptual and conceptual priming in Alzheimer's disease. *Behavioral Neuroscience*, *105*, 326–342.
- Mace J. H. (2003). Involuntary aware memory enhances priming on a conceptual implicit memory task. *The American Journal of Psychology*, *116*(2), 281–290.
- McDermott, K. B., & Roediger, H. L. (1996). Exact and conceptual repetition dissociate conceptual memory tests: Problems for transfer appropriate processing theory. *Canadian Journal of Psychology*, *50*, 57–71.
- McKone, J. A., & Slee, E. (1997). Explicit contamination in "implicit" memory for new associations. *Memory & Cognition*, *25*, 352–366.
- Mecklenbräuker, S., Hupbach, A., & Wippich, W. (2003). Age-related improvements in a conceptual implicit memory test. *Memory & Cognition*, *31*, 208–217.
- Miller, P. (1990). The development of strategies of selective attention. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children strategies: Contemporary views of cognitive development* (pp. 157–184). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Monti, L. A., Gabrieli, J. D. E., Wilson, R. S., & Reminger, S. L. (1994). Intact text-specific implicit memory in patients with Alzheimer's disease. *Psychology and Aging*, *9*(1), 64–71.
- Moscovitch, M. (1992). Memory and working-with-memory: A component process model based on modules and central systems. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *4*(3), 257–267.
- Moscovitch, M. (2008). The hippocampus as a "stupid," domain-specific module: Implications for theories of recent and remote memory, and of imagination. *Canadian Journal Experimental of Psychology*, *62*(1), 62–79.
- Mulligan, N. W. (1996). The effects of perceptual interference at encoding on implicit memory, explicit memory and memory for source. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *22*, 1067–1087.
- Mulligan, N. W. (2002). The effects of generation on conceptual implicit memory. *Journal of Memory and Language*, *47*, 327–342.
- Mulligan, N. W., Guyer, P. S., & Beland, A. (1999). The effects of levels-of-processing and organization on conceptual implicit memory in the category exemplar production test. *Memory & Cognition*, *27*, 633–647.
- Murphy, K., McKone, E., & Slee, J. (2003). Dissociations between implicit and explicit memory in children: The role of strategic processing and the knowledge base. *Journal of Experimental Child Psychology*, *84*, 124–165.

- Murphy, K., McKone, E., & Slee, J. (2006). Absolute versus relative difference measures of priming: Which is appropriate when baseline scores change with age? *British Journal of Developmental Psychology*, *24*, 293–304.
- O'Sullivan, J. (1996). The children's metamemory about the influence of conceptual relations on recall. *Journal of Experimental Child Psychology*, *62*, 1–29.
- Parker, A., Dagnall, N., & Coyle, A. M. (2007). Effect of environmental context on conceptual explicit and implicit memory. *Memory*, *15*, 423–434.
- Parkin, A. J. (1997). The developmental of procedural and declarative memory. In N. Cowan (Ed.), *The developmental of memory in childhood* (pp. 113–139). Hove, UK: Psychology Press.
- Perez, L. A., Peynircioglu, Z. F., & Blaxton, T. A. (1998). Developmental differences in implicit and explicit memory performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, *70*, 167–185.
- Perruchet, P., Frazier, N., & Lautrey, J. (1995). Conceptual implicit memory: A developmental study. *Psychological Research*, *57*, 220–228.
- Rappold, V. A., & Hashtroudi, S. (1991). Does organization improve priming? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *17*(1), 103–114.
- Raz, N. (2000). Differential aging of the cerebral cortex: Implications for age-related differences in memory. *International Journal of Psychology*, *35*(3–4), 85–93.
- Richardson-Klavehn, A., Gardiner, J. M., Rosalind, I., & Java, R. I. (1996). Memory: Task dissociations, process dissociation, and dissociation of consciousness. In G. Underwood (Ed.), *Implicit cognition* (pp. 85–158). New York, NY: Oxford University Press.
- Roediger, H. L., & Blaxton, T. A. (1987). Effect of varying modalities, surface features, and retention interval on priming in word fragment completion. *Memory and Cognition*, *15*, 379–388.
- Roediger, H. L., Gallo, D. A., & Geraci, L. (2002). Processing approaches to cognition: The impetus from the levels of processing framework. *Memory*, *10*, 319–332.
- Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1993). Implicit memory in normal human subjects. In H. Spinnler & F. Boller (Eds.), *Handbook of neuropsychology* (Vol. 8, pp. 63–131). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented on lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 803–814.
- Russo, R., Nichelli, P., Gibertoni, M., & Cornia, C. (1995). Developmental trends in implicit and explicit memory: A picture completion study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *59*, 566–578.
- Salmon, D. P., Shimamura, A. P., Butters, N., & Smith, S. (1988). Lexical and semantic priming deficits in patients with Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *10*, 477–494.
- Sauzéon, H., Lestage, P., Raboutet, C., N'Kaoua, B., & Claverie, B. (2004). Verbal fluency output in children aged 7–16 as a function of the production criterion: Qualitative analysis of clustering, switching processes, and semantic network exploitation. *Brain and Language*, *89*(1), 192–202.
- Schacter, D. L. (1990). Introduction to "Implicit memory: Multiple perspectives." *Bulletin of the Psychonomic Society*, *28*, 338–340.
- Schacter, D. L., & Buckner, R. L. (1998). On the relations among priming, conscious recollection, and intentional retrieval: Evidence from neuroimaging research. *Neurobiology of Learning and Memory*, *70*(1–2), 284–303.
- Schneider, W. (2000). Research on memory development: Historical trends and current themes. *International Journal of Behavioral Development*, *24*, 407–420.
- Seamon, J. G., Luo, C. R., Schlegel, S. E., Greene, S. E., & Goldenberg, A. B. (2000). False memory for categorized pictures and words: The category associates procedure for studying memory errors in children and adults. *Journal of Memory and Language*, *42*(1), 120–146.
- Sherry, D. F., & Schacter, D. L. (1987). The evolution of multiple memory systems. *Psychological Review*, *94*, 439–454.
- Squire, L. R. (1992). Memory and the hippocampus: A synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. *Psychological Review*, *99*, 195–231.

- Squire, L. R. (1994). Declarative and nondeclarative memory: Multiple brain systems supporting learning and memory. In D. L. Schacter & E. Tulving (Eds.), *Memory systems* (pp. 203–232). Cambridge MA: MIT Press.
- Taconnat, L., Raz, N., Toczé, C., Bouazzaoui, B., Sauzéon, H., Fay, S., et al. (2009). Aging and organization strategies in free recall: The role of cognitive flexibility. *European Journal of Cognitive Psychology*, *21*(2/3), 347–365.
- Ters, F., Mayer, G., & Reichenback, D. (1995). *L'échelle Dubois-Buyse d'orthographe usuelle française*. France: Editions Midi.
- Teuber, H. L. (1955). Physiological psychology. *Annual Review of Psychology*, *6*, 267–296.
- Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., & Kan, I. P. (1999, April). *Double dissociation of frontal and temporal lobe contributions to semantic memory*. Paper presented at the Cognitive Neuroscience Society Annual Meeting, Washington, DC.
- Tulving, E., & Schacter, D. L. (1990). Priming and human memory systems. *Science*, *247*, 301–306.
- Vaidya, C. J., Gabrieli, J. D. E., Keane, M. M., Monti, L. A., Gutierrez-Rivas, H., & Zarella, M. M. (1997). Evidence for multiple mechanisms of conceptual priming on implicit memory tests. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *23*, 1324–1343.
- Weede, A. K. (2003). Implicit and explicit memory: An investigation of developmental trajectories. *Dissertation Abstracts International: Section B: The Sciences and Engineering*, *63*(9-B), 43–96.
- Weldon, M. S., & Coyote, K. C. (1996). Failure to find the picture superiority effect in implicit conceptual tests. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *22*, 670–686.
- West, R. L., & Thorn, R. M. (2001). Goal-setting, self-efficacy, and memory performance in older and younger adults. *Experimental Aging Research*, *27*(1), 41–65.
- Wiggs, C. L., & Martin, A. (1998). Properties and mechanisms of perceptual priming. *Current Opinion in Neurobiology*, *8*(2), 227–233.
- Yeates, Y. O., & Enrile, B. G. (2005). Implicit and explicit memory in children with congenital and acquired brain disorder. *Neuropsychology*, *19*(5), 618–628.

## APPENDIX A

Studied Items For Associative-Cued Recall Test		Studied and Unstudied Items for FA test	
Parasol	<i>Parasol</i>	<b>Targets A</b>	
Chocolat	<i>Chocolate</i>	Ampoule	<i>Bulb</i>
Larme	<i>Tea</i>	Griffe	<i>Claw</i>
Grotte	<i>Cave</i>	Chaise	<i>Chair</i>
Talon	<i>Heel</i>	Tour	<i>Tower</i>
Paille	<i>Straw</i>	Echarpe	<i>Scarf</i>
Lune	<i>Moon</i>	Fourchette	<i>Fork</i>
Rideau	<i>Curtain</i>	Voiture	<i>Car</i>
Tabac	<i>Tobacco</i>	Tiroir	<i>Drawer</i>
Vagues	<i>Waves</i>	Farine	<i>Flour</i>
Croix	<i>Cross</i>	Agneau	<i>Lamb</i>
Antenne	<i>Antenna</i>	<b>Targets B</b>	
Photo	<i>Photo</i>	Bijou	<i>Jewel</i>
Hibou	<i>Owl</i>	Pointe	<i>Spike</i>
Flamme	<i>Flame</i>	Omelette	<i>Omelet</i>
Vitrine	<i>Showcase</i>	Tapis	<i>Carpet</i>
Pierre	<i>Stone</i>	Film	<i>Film</i>
Douche	<i>Shower</i>	Mousse	<i>Foam</i>
Couverture	<i>Coverage</i>	Pont	<i>Bridge</i>
Glaçon	<i>Iceberg</i>	Stylo	<i>Pen</i>
		Grenouille	<i>Frog</i>
		Vaisselle	<i>Tableware</i>
		<b>Fillers A &amp; B</b>	
		Herbe	<i>Grass</i>
		Lessive	<i>Laundry</i>
		Sapin	<i>Fir</i>
		Ballon	<i>Balloon</i>
		Vin	<i>Wine</i>
		Serrure	<i>Lock</i>
		Clown	<i>Clown</i>
		Manège	<i>Carousel</i>
		Fusée	<i>Rocket</i>
		Cerise	<i>Cherry</i>



## APPENDIX B

Studied Items for Category-Cued Recall Tests				Studied and Unstudied Items for CEG tests			
List 1		List 2		List 1		List 2	
Chaussure	<i>Shoe</i>	Salon	<i>Lounge</i>	<b>Target A</b>		<b>Target A</b>	
Chemise	<i>Shirt</i>	Couloir	<i>Corridor</i>	Livres	<i>Books</i>	Pneu	<i>Tire</i>
Veste	<i>Jacket</i>	Cuisine	<i>Kitchen</i>	Tables	<i>Tables</i>	Klaxon	<i>Horn</i>
Pantalon	<i>Pants</i>	Grenier	<i>Attic</i>	Règles	<i>Rules</i>	Vitre	<i>Window</i>
Robe	<i>Dress</i>	Chambre	<i>Bedroom</i>	Craies	<i>Chalks</i>	Ceinture	<i>Seat belt</i>
Marteau	<i>Hammer</i>	Brouillard	<i>Fog</i>	Brosse	<i>Brush</i>	(sécurité)	
Perceuse	<i>Drill</i>	Orage	<i>Storm</i>	Frigo	<i>Fridge</i>	Radio	<i>Radio</i>
Pinces	<i>Pliers</i>	Neige	<i>Snow</i>	Machine-à-	<i>Washing</i>	Maquillage	<i>Makeup</i>
Scie	<i>Saw</i>	Pluie	<i>Rain</i>	laver	<i>machine</i>	Rasoir	<i>Razor</i>
Tournevis	<i>Screwdriver</i>	Vent	<i>Wind</i>	Télévision	<i>Television</i>	Gel	<i>Gel</i>
Auto	<i>Auto</i>	Main	<i>Hand</i>	Lampe	<i>Lamp</i>	Peigne	<i>Comb</i>
Avion	<i>Aircraft</i>	Jambe	<i>Leg</i>	Four	<i>Oven</i>	Crème	<i>Cream</i>
Bus	<i>Bus</i>	Tête	<i>Head</i>	<b>Target B</b>		<b>Target B</b>	
Moto	<i>Motorcycle</i>	Coude	<i>Elbow</i>	Aigle	<i>Eagle</i>	Viande	<i>Meat</i>
Train	<i>Train</i>	Orteil	<i>Toe</i>	Chien	<i>Dog</i>	Nouilles	<i>Noodles</i>
Branche	<i>Branch</i>	Skis	<i>Skis</i>	Dauphin	<i>Dolphin</i>	Sucre	<i>Sugar</i>
Ecorce	<i>Bark</i>	Canoë	<i>Canoe</i>	Lapin	<i>Rabbit</i>	Sardine	<i>Sardine</i>
Feuille	<i>Sheet</i>	Raquettes	<i>Snowshoeing</i>	Lion	<i>Lion</i>	Frites	<i>Chips</i>
Racine	<i>Root</i>	Surf	<i>Surfing</i>	Billes	<i>Balls</i>	Poignard	<i>Dagger</i>
Tronc	<i>Trunk</i>	Patins	<i>Skates</i>	Robot	<i>Robot</i>	Epée	<i>Sword</i>
				Peluche	<i>Plush</i>	Canon	<i>Gun</i>
				Poupée	<i>Doll</i>	Arc	<i>Arc</i>
				Puzzle	<i>Puzzle</i>	Fusil	<i>Gun</i>
				<b>Fillers A&amp;B</b>		<b>Fillers A&amp;B</b>	
				Rose	<i>Rose</i>	Armoire	<i>Wardrobe</i>
				Marguerite	<i>Daisy</i>	Canapé	<i>Sofa</i>
				Pâquerette	<i>Little daisy</i>	Fauteuil	<i>Chair</i>
				Tulipe	<i>Tulip</i>	Tabouret	<i>Stool</i>
				Violette	<i>Violet</i>	Bureau	<i>Office</i>
				Appartement	<i>Apartment</i>	Trompette	<i>Trumpet</i>
				Cabane	<i>Hut</i>	Piano	<i>Piano</i>
				Caravane	<i>Caravan</i>	Guitare	<i>Guitar</i>
				Hôtel	<i>Hotel</i>	Flûte	<i>Flute</i>
				Immeuble	<i>Building</i>	Violon	<i>Violin</i>

# Virtual/Real Transfer of Spatial Knowledge: Benefit from Visual Fidelity Provided in a Virtual Environment and Impact of Active Navigation

Grégory Wallet, Ph.D.,<sup>1</sup> H el ene Sauz eon, Ph.D.,<sup>1</sup> Prashant Arvind Pala,<sup>1</sup>  
Florian Larrue,<sup>1</sup> Xia Zheng, Ph.D.,<sup>2</sup> and Bernard N'Kaoua, Ph.D.<sup>1</sup>

## Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect the visual fidelity of a virtual environment (VE) (undetailed vs. detailed) has on the transfer of spatial knowledge based on the navigation mode (passive vs. active) for three different spatial recall tasks (wayfinding, sketch mapping, and picture sorting). Sixty-four subjects (32 men and 32 women) participated in the experiment. Spatial learning was evaluated by these three tasks in the context of the Bordeaux district. In the wayfinding task, the results indicated that the detailed VE helped subjects to transfer their spatial knowledge from the VE to the real world, irrespective of the navigation mode. In the sketch-mapping task, the detailed VE increased performances compared to the undetailed VE condition, and allowed subjects to benefit from the active navigation. In the sorting task, performances were better in the detailed VE; however, in the undetailed version of the VE, active learning either did not help the subjects or it even deteriorated their performances. These results are discussed in terms of appropriate perceptive-motor and/or spatial representations for each spatial recall task.

## Introduction

### *Spatial cognition*

**S**PATIAL NAVIGATION COVERS ALL of the "intelligent" movement activities (either ambulatory or non-ambulatory) that an individual can carry out within a space (either limited or not). Navigation is generally broken down into two components: a motor component (or locomotion) relative to an individual's movements and a cognitive component, called "wayfinding," which corresponds to the development and appropriate use of topographic representations allowing these movements.<sup>1,2</sup> The wayfinding component is multi-determined and requires the orchestration of executive components (i.e., planning, evaluation, and monitoring), as well as mental imagery and spatial memory components (i.e., the construction of mental representations of space and their storage).

Spatial memory is comprised of topographic representations accumulated by an individual, which classically fall within three levels according to the L-R-S model described by Siegel and White.<sup>3</sup> (a) Level 1—*Landmark knowledge* can be likened to the memory of objects in an environment. It allows us to affirm that an object is either present or not in a given environment and/or to recognize the object in the environ-

ment or in an external representation of it.<sup>4</sup> Certain authors have also described this type of knowledge as static and declarative,<sup>5</sup> that is, without further information linked to movement or action procedures. (b) Level 2—*Route knowledge* concerns the sequence of actions that need to be carried out in order to complete a route in an environment.<sup>6</sup> It is therefore procedural knowledge that allows an individual to go from a point of departure to a point of arrival.<sup>7</sup> These first two levels correspond to egocentric-type representations (i.e., the body serves as a reference). (c) Level 3—*Survey knowledge* is the most developed level of visual-spatial representation; the mental representation of the environment is complete and allocentric (i.e., an external point serves as a reference) and mimics a "bird's-eye view" containing the route and various landmarks. It allows the estimation of distances as the crow flies and the judgment of relative relationships between two points. Survey knowledge is often closer to Tolman's "cognitive map" concept,<sup>8</sup> which is defined as integrating points (landmarks), lines (roads, paths, etc.), areas (regions), and surfaces (buildings, 3-D shapes).<sup>9</sup>

Nevertheless, acquiring spatial knowledge in these three knowledge levels is not necessarily done step by step, but can also be done through parallel processes.<sup>10</sup> The brain can

<sup>1</sup>Universit e Victor Segalen Bordeaux II, Bordeaux, France.

<sup>2</sup>Beijing Normal University, Beijing, China.

“switch” between egocentric and allocentric representations during navigation.<sup>11</sup> In many situations, the acquisition of all the knowledge levels is not necessary and knowledge of the overview is not used.<sup>12</sup> The last level allows people to take shortcuts or new paths in an environment; however, the second level may be sufficient to reproduce a route in an environment.<sup>13,14</sup> Given these limitations, alternative theories have been developed, notably the *graph approach*, which gives the enacted spatial representations a central role. The starting point of the graph approach is the distinction between a *cognitive* and *perception-action system*: the cognitive system underlies the development of internal representations (based on configuration) and the perception-action system generates representations that associate motor responses with views or places.<sup>15-17</sup> The first allows the use of strategies based on configuration (survey-based), while the second induces strategies based on the route (route-based). Thus the reproduction of a route could equally be guided by a mental representation of the configuration of the space as it could by perceptual-motor representations.<sup>18,19</sup>

#### *Virtual reality and spatial cognition*

In recent years, research in spatial cognition has benefited from the introduction of virtual reality (VR) technologies.<sup>20</sup> These technologies are generally used to study navigation but also to assess the transfer of learning from a virtual environment (VE) to the real world (field of psychological applications to VR).

Several studies have shown that spatial learning acquired in a VE is substantially similar to that acquired in real conditions.<sup>21-24</sup> These studies have also indicated that the effective transfer of spatial knowledge from virtual to real environments depends on several variables relative to internal factors (i.e., characteristics of the subjects), as well as external factors (i.e., characteristics of the VR systems and learning/recall conditions). Within this context, the general aim of this present work is to study certain factors that might improve the transfer of spatial knowledge from virtual to real situations. More precisely, we are interested in two external factors: the visual fidelity of the VE (factor linked to the characteristics of the VE) and the navigation mode (factor linked to the learning phase).

There has been little study of visual fidelity, and its impact on the virtual-real transfer of spatial knowledge, in the field of spatial cognition; the study of the effect of visual fidelity is more often seen in work concerned with a feeling of immersion produced by a VE.<sup>25</sup> Only three studies have been conducted on the influence of the visual fidelity of a VE on spatial representations, often without addressing virtual-real transfers.<sup>26-28</sup> The tasks used included: pointing, distance estimations (in Waller et al., 2001),<sup>26</sup> object recognition (in Stankiewicz and Kalia, 2007)<sup>27</sup> and reverse route reproduction, the recognition of a route map, a freehand sketch of the route, and scene recognition (in Meijer et al., 2009).<sup>28</sup> The way in which the concept of visual fidelity was made operational was different from one study to another. In Stankiewicz and Kalia's study,<sup>27</sup> the manipulation of the visual fidelity factor refers to the fact that the landmarks in the VE are either structural (i.e., geometric shapes without texture) or “textured” photographs of objects. The best performances are obtained in the structural landmark condition. Waller et al.<sup>26</sup>

used their virtual fidelity to compare three different virtual mazes: a VE with wired transparent walls (*wireframe VE*, i.e., a structural VE), a VE with a rendering of the surfaces on the walls (*surface-rendered VE*), and the same environment in the real world (*real world*). Again, the VE with the least “fidelity” to the real world, visually speaking (i.e., the wireframe VE), is the one that allows the best performances. For these authors, information on the structure is more relevant than perceptive information (e.g., colors, texture, etc.). Information on the structure allows more information to be obtained about the general configuration of the environment, and therefore facilitates the development of a cognitive map. Meijer et al.<sup>28</sup> recently compared a non-photorealistic virtual supermarket with his photorealistic reproduction: the “photorealistic” condition improves performances in the reverse route reproduction and scene recognition tasks, whereas there is no significant effect between the two VEs for the route map recognition and freehand route reproduction tasks. For these authors, this suggests that by favoring visual inputs, a photorealistic VE optimizes the construction of egocentric spatial representations (Landmark and Route levels of Siegel and White's model),<sup>3</sup> but not, or very few, developed representations (Survey level). As egocentric representations are also involved in the wayfinding task, it can be expected that an accurate VE optimizes performances. In other words, the virtual-real transfer of spatial representations in a “wayfinding” task could be favored by high visual fidelity conditions.

The use of a motor interactor, such as a keyboard or a joystick, was very early on thought of as a tool allowing the better integration of a route. According to the taxonomy presented by Wilson et al.,<sup>29</sup> four navigation modes can be distinguished: (a) physically passive navigation (the subject visualizes the VE without moving), (b) physically active navigation (the subject moves using a motor interactor), (c) psychologically passive navigation (the subject follows directions), and (d) psychologically active navigation (the subject freely explores the VE). In our study, we compared passive (i.e., the passive condition) and active physical navigation (i.e., the active condition).

As shown in a previous work, active navigation enhances perceptual-motor representations of the VE by favoring the integration of visual and motor inputs.<sup>30,31</sup> However, its beneficial role in the construction of spatial representations has not yet been clearly shown.

The superiority of an active physical navigation for the acquisition of spatial knowledge has sometimes been observed,<sup>32,33</sup> but not always.<sup>29, 34-36</sup> Some studies have even reported that the superiority of active navigation depends on the spatial representation addressed by the recall tasks used.<sup>37-39</sup> Often, when a benefit is observed, it is generally claimed that the active learning optimizes perceptual-motor integration particularly required to the construction of egocentric spatial representation (Landmark and Route levels). Regarding its effect on the transfer of spatial learning from a VE to a real environment, it is even more difficult to reach a conclusion because only two studies have been conducted.<sup>24,39</sup> Péruch et al.<sup>39</sup> suggested comparing the results of active participants who controlled their movements with a mouse to those from participants who visualized a recorded route. After training in a VE, the participants were tested in both a VE and in the real world (in a neighborhood) via two

tasks: orientation judgment and distance estimation. These authors showed that active learning had a positive effect on the second task, but not the first. Overall, the role of “active navigation” as a factor optimizing the virtual–real transfer of spatial representations still needs to be explored and better understood, given the few studies devoted to this and their contradictory results. In agreement with the work presented above, we propose that active navigation favors perceptual-motor performances when learning in a VE.<sup>37–39</sup>

Starting with all the data in the literature,<sup>26–28</sup> we propose to examine the impact the visual fidelity of a VE (factor related to the characteristics of the VE) has on the virtual–real transfer of spatial learning. We also examined the physical navigation mode (active vs. passive). Therefore, in two navigation conditions, physically active (with a joystick) and physically passive (simple visualization), we compared an undetailed VE to a reproduction that included colors and textures corresponding to those present in the real environment that served as a model.

In accordance with the literature relative to visual fidelity effect<sup>26–28</sup> and the active navigation effect<sup>32–39</sup> we suggest that a detailed VE explored actively favors the construction of low-level egocentric spatial representations (Landmark and Route level), whereas an undetailed VE explored passively favors the construction of high-level allocentric representations (Survey level). Indeed, for recall, the literature indicates that the visual appearance of the VE<sup>26</sup> and the active exploration<sup>39</sup> during learning are more influential for egocentric spatial representation.

To test this hypothesis, we used three standard spatial cognition tasks: wayfinding, sketch mapping, and picture sorting (these tasks are described in further detail in the Methods section). In accordance with the L-R-S model,<sup>3</sup> picture sorting (of the route in chronological order) in particular solicits egocentric spatial representations (i.e., Landmark and Route levels), whereas sketch mapping in an allocentric view preferentially requires the development of a cognitive map (i.e., Survey level). Finally, the reproduction of a route (wayfinding) involves the three levels of spatial knowledge while using the perception–action system (i.e., the association between landmarks and the choice of directions).<sup>18,19</sup> Note that the wayfinding task, which consists of reproducing a route, is the more environmentally friendly task, since it is closest to daily spatial activities and is a measure of the virtual–real transfer of spatial knowledge. On the contrary, the other two tasks, which are less environmentally friendly, measure the use of spatial knowledge acquired in the VE in paper and pencil tasks. We used an entire neighborhood in a city in order to have a “natural” environment that could be explored throughout the course of daily activities.

We expect the following results according to the tasks: a detailed VE favors visual inputs, encourages the construction of egocentric spatial representations, and is therefore beneficial to tasks mobilizing this type of representation (i.e., wayfinding and picture sorting in chronological order); physically active navigation favors the construction of perceptual-motor performances and is beneficial for tasks involving this type of representation (i.e., wayfinding). In other words, participants will be more successful in the wayfinding task if the VE has more details and is more actively explored.

## Materials and Methods

### Participants

The participants were 64 student volunteers from Victor Segalen Bordeaux 2 University (32 men and 32 women;  $M$  age = 20 years old). All subjects were native French speakers and right-handed. A total of 32 subjects participated in the undetailed condition and 32 participated in the detailed condition (corresponding to the type of VE). For each condition, two groups of 16 subjects (eight men and eight women) were formed according to the type of learning (passive virtual vs. active virtual). To balance the groups, subjects performed paper-pencil tests assessing their spatial skills as follows: the Survey Aptitude Test<sup>40</sup> (parts 5 and 6 only) and the Mental Rotation Test.<sup>41</sup> There were no significant differences in performance on these tests between each group.

### Material

Two VEs were used in our experiment: undetailed versus detailed. The two VEs were 3D reproductions of a real environment, that is, an area near Bordeaux hospital, (created in 2006 by engineering students from the Bordeaux 2 University using the Virtools<sup>®</sup> software). The undetailed version of the VE was used exactly the same VE as in the detailed version of the VE, except without either color or texture. Figure 1 illustrates the differences between these two VEs. The route proposed to the participants was constructed as follows: 1,457 meters long, 14 streets, 18 intersections, and 18 direction changes.<sup>6</sup> To manipulate the navigation mode in the VE under the passive condition, participants only visualized the route without any interaction, whereas under the active condition they used a joystick to interact with the VE.

The apparatus used in the virtual reality room was a Dell<sup>®</sup> personal computer (3 GHz, 5Gb RAM) with an nVidia<sup>®</sup> Quadro FX 4400 graphics card, a F1+<sup>®</sup> projector, a 2×1.88 meter screen and a Logitech<sup>®</sup> force 3-D pro joystick for the active navigation mode.

### Procedure

The experiment procedure was as follows for each participant. (a) *Training phase*: the subject freely explored a VE that was similar to the VE used in the experiment (i.e., representing a different area of Bordeaux but created with the same software) in order to familiarize the subject with the VR system. (b) *Learning phase of the route*: the participants were seated 2 meters from the display screen for visualized the route during. Depending on randomization, participants either visualized the *undetailed* or *detailed* VE. In each condition, the participants were divided into two groups according to the display mode: (i) *passive navigation* (with a pre-determined route and an experimenter who used his arm to indicate direction changes. The pre-determined route proposed was a recorded navigation); (ii) *active navigation* (the participant used a joystick and the experimenter used his arm to indicate direction changes). In the two type of navigation (passive and active) the point of view was egocentric (at shoulder-high) and the scroll speed was 5 kilometers per hour. (c) *Test phase*: three spatial knowledge recall tasks (presented in counterbalanced order between the participants)

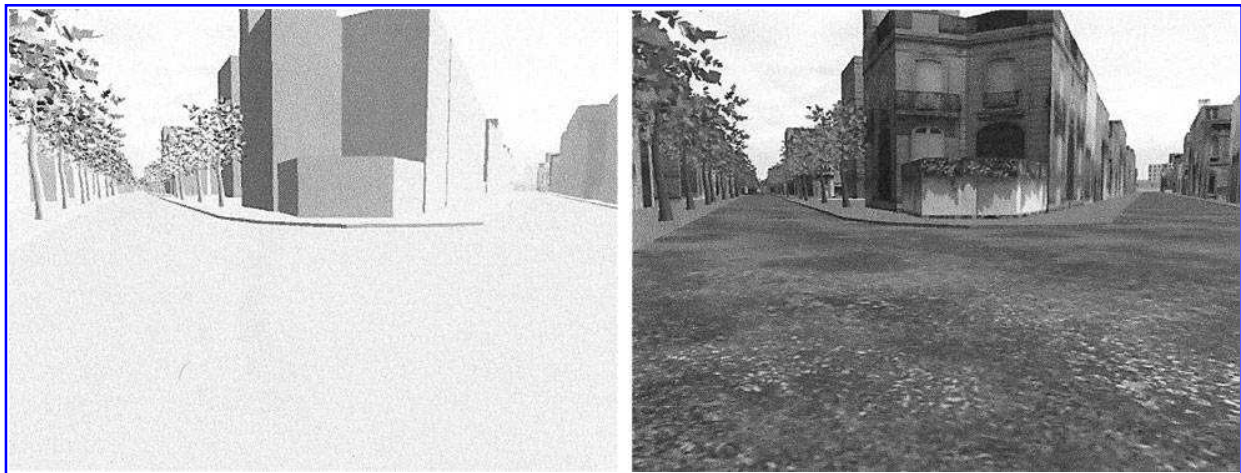


FIG. 1. Undetailed virtual environment (left) and detailed virtual environment (right). More, the detailed virtual environment was broadcasted in color, but not the undetailed.

were used. (i) *Wayfinding task in the real world*: participants had to reproduce the learned route in the real world. Direction errors and hesitations (when participants stopped for two seconds or longer and turned their heads in two different directions before walking off again) were noted. In the case of errors, participants were stopped and asked to take another direction. In some cases, the participants hesitated followed by a directional error, or even made several directional errors in the same intersection. In all cases, each error or hesitation was counted. (ii) *Sketch-mapping task*: participants had to draw a freehand sketch of the visualized route. The required sketch was a simple outline with connected segments. The task was to indicate the directional changes and to count them. The number of directional changes missing was counted. (iii) *Scene-sorting task*: participants had to sort a series of 12 pictures taken along the route (in the real world) into chronological order. The number of pictures incorrectly positioned was counted.

## Results

For each spatial knowledge recall task, the results were analyzed with a 2×2 (navigation: passive vs. active×VE design: undetailed vs. detailed) analysis of variance (ANOVA) with independent measures.\* All means and standard deviations are reported in Table 1. We used the Fisher test for post hoc comparisons ( $p=0.01$ ).

\*In order to exclude any possible mediating effects of subject variables, such as gender or spatial skills, all the results from the three spatial recall tasks (wayfinding, sketch mapping, and scene sorting) were previously analyzed using an ANCOVA 3×2 (Navigation: Passive virtual vs. Active virtual vs. Real x Route: Simple vs. Complex) with gender or spatial skills (RMT, GZ-5, and GZ-6 scores) as the covariant factors. Neither the simple gender effect nor its interaction with other factors had no significant impact on any of the spatial tasks ( $p>0.100$ ). Similarly, the spatial skill factor had no significant impact on any of the spatial tasks ( $p>0.100$ ). Consequently, neither gender nor spatial skill differences had any significant mediating effect. This finding reflects the fact that the subject groups were selected for their similar spatial skills (as measured by the G-Z and MRT scales), so the women selected were probably high spatial performers, thus offsetting any gender differences.

TABLE 1. PERFORMANCE MEANS (%) AND STANDARD DEVIATIONS IN PARENTHESES FOR EACH RECALL TASK AS A FUNCTION OF TYPE OF VIRTUAL ENVIRONMENT DESIGN AND NAVIGATION MODE

Recall task	Undetailed virtual environment		Detailed virtual environment	
	Passive	Active	Passive	Active
Wayfinding (errors)	38.19 (15.30)	31.60 (14.59)	17.01 (6.24)	11.80 (4.48)
Wayfinding (hesitations)	40.97 (13.74)	34.93 (16.44)	14.93 (5.64)	8.68 (4.04)
Sketch mapping	43.40 (7.37)	39.93 (8.17)	41.67 (10.34)	19.44 (7.31)
Scene classification	64.27 (11.77)	81.56 (14.47)	54.17 (5.52)	50.83 (13.40)

### Wayfinding task in the real world

The two indicators, direction and hesitation errors, were transformed into percentages (out of a total of 23 possible errors). For direction errors, the ANOVA analysis revealed:

- a significant effect for VE:  $F(1, 60) = 53,090$ ;  $p < 0.0001$ . Indeed, better performances were observed under the detailed VE condition compare to the undetailed VE condition;
- a significant effect for navigation:  $F(1, 60) = 4,408$ ;  $p < 0.05$ . Better performances were obtained in the active condition compared to the passive one;
- a nonsignificant effect for the "navigation×VE" interaction ( $p > 0.800$ ), indicating a similar performance pattern (i.e., learning in detailed condition > learning in undetailed condition), irrespective of the mode of navigation.

For hesitation errors, the ANOVA analysis revealed:

- a significant effect for VE:  $F(1, 60) = 86,236$ ;  $p < 0.0001$ . Indeed, better performances were observed under the detailed VE condition compare to the undetailed VE condition;

- a significant effect for navigation:  $F(1, 60) = 4,765$ ;  $p < 0.05$ . Better performances were obtained in the active condition compared to the passive one;
- a nonsignificant effect for the "navigation $\times$ VE" interaction ( $p > 0.900$ ).

#### Sketch-mapping task

In this task, the errors and omissions in changes of direction in the sketches were counted and then expressed as percentages (out of a total of 18 possible errors). The ANOVA analysis revealed:

- a significant effect for VE:  $F(1, 60) = 28,055$ ;  $p < 0.0001$ . Indeed, better performances were observed under the detailed VE condition compared to the undetailed VE condition;
- a significant effect for navigation:  $F(1, 60) = 37,507$ ;  $p < 0.0001$ . Better performances were obtained in the active condition compared to the passive one;
- a significant effect for the "navigation $\times$ VE" interaction:  $F(1, 60) = 19,973$ ;  $p < 0.0001$ . The performances under the passive and active conditions were not significantly different in the undetailed VE condition. By contrast, the performances in the active condition were significantly superior to those obtained in the passive condition when participants learned in the detailed VE condition (i.e., a positive effect of the active condition).

#### Picture-sorting task

In this task, the experimenter counted the sorting errors. This score was then compared to the best potential score (i.e., 12) in order to obtain percentages. The ANOVA results revealed:

- a significant effect for VE:  $F(1, 60) = 34,723$ ;  $p < 0.0001$ . Indeed, better performances were observed under the detailed VE condition compared to the undetailed VE condition;
- an inverse significant effect for navigation:  $F(1, 60) = 4,057$ ;  $p < 0.05$ . Better performances were obtained in the passive condition compared to the active one;
- a significant effect for the "navigation $\times$ VE" interaction:  $F(1, 60) = 8,859$ ;  $p < 0.005$ . In the undetailed VE condition, participants who learned in the active condition performed worse compared to those participants who learned in the passive condition (i.e., a negative effect of the active condition). In the detailed VE condition, participants did not benefit from the active condition.

#### Discussion

According to the type of physical navigation (passive vs. active), this study assessed the impact the visual fidelity of a VE had on spatial knowledge transfer in three different spatial recall tasks (wayfinding, sketch mapping, and picture sorting).

In the wayfinding task and for each indicator (i.e., errors and hesitations), performances were better in the detailed VE condition (errors  $< 20\%$ ), compared to the undetailed VE condition (errors  $> 30\%$ ). The more accurate a VE is compared to the real world (from a visual realism perspective), the more the quality of the virtual–real transfer is improved.

These results agree with those in the literature.<sup>26–28</sup> In fact, previous studies have shown that VEs, such as mazes, that have the least visual fidelity to the real world lead to the better learning of configurational information. In our study, we showed that in a large-scale natural VE (i.e., the neighborhood of a city), the visual richness of the VE (i.e., the addition of color and texture) optimizes wayfinding performances. Consequently, the effect of visual fidelity appears to depend on the informational demands of the task. A VE with few visual details is appropriate if the subsequent recall task requires configurational information (e.g., orientation judgment, distance estimation). In contrast, a VE with visual fidelity will be more appropriate if the task depends on visual details being available in the memory (e.g., the wayfinding task).

Our results also show that the virtual–real transfer of spatial knowledge is enhanced by physically active learning in the VE and the benefit obtained is not altered by the conditions of the visual fidelity of the VE during learning. This suggests that, in the wayfinding task, the perception–action coupling reinforced by active learning is not dependent on the amount of visual information delivered by the VE.

For the two other tasks, there is an interaction between the visual fidelity factors and navigation mode, specifically: (a) a detailed VE provides a benefit of active learning in the sketch-mapping task; (b) an undetailed VE induces a negative effect of active learning in the picture sorting task.

In addition, if based on high-level spatial knowledge (Survey level), the sketch task may in some cases be based on a mental simulation of actions (i.e., changes in direction), as proposed by Waller et al. (2000).<sup>26</sup> Thus the benefit of physically active learning in the detailed VE condition could be understood as a strengthening of the perception–action coupling, made possible only by the visual enrichment of the VE. In other words, in a sketch task based primarily on allocentric representations, the subject would use perceptual-motor representations only if the memorized visual information from the VE is sufficiently detailed.

In the picture-sorting task, the visual deterioration of a VE negatively affects active learning. The sorting task is primarily based on visual information.<sup>42</sup> The views, which do not provide enough information in the "undetailed" condition, do not seem to generate a fine visual discrimination. Moreover, strengthening the perception–action coupling induced by active learning could enhance the memorization of views related to direction changes at the expense of other views. The result is a patchy memorization of the views based on the presence or absence of an associated action that could decrease performances in terms of picture sorting for the entire route.

Regardless of the recall task, we report that the visual fidelity of a VE has a significant effect. Overall, a VE that is impaired in terms of its visual fidelity deteriorates the performance of subjects in virtual–real transfers (wayfinding) or the use of spatial representations ("paper and pencil" tasks). In the perspective of neuropsychological applications, these findings are particularly relevant for therapists and designers of VEs that are to be used in rehabilitation programs,<sup>43</sup> particularly for patients with navigational deficits. Indeed, the fact that the impact of visual fidelity varies depending on the navigation mode and recall tasks used suggests that realism

should not be the main factor guiding the design of learning systems in VEs. Further investigations need to be conducted to identify which spatial tasks/activities allow quality to be transferred to the real world after learning in a VE that is either visually rich or not.

### Disclosure Statement

No competing financial interests exist.

### References

- Bowman DA, Hodges L, Bolter J. The virtual venue: User-computer interaction in information-rich virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1998; 7:478–93.
- Conroy RA. Spatial navigation in immersive virtual environments. Ph.D. thesis, Department of Architecture, University College London, 2001.
- Siegel AW, White SH. (1975) *The development of spatial representations of largescale environments*. New York: Academic Press.
- Thorndyke PW, Goldin SE. (1983) Spatial learning and reasoning skill. In Pick HL, Acredolo LP, eds. *Spatial orientation: Theory, research and application*. New York: Plenum Press, pp. 195–217.
- Darken RP, Peterson B. (2002) Spatial orientation wayfinding and representation. In Stanney K, ed. *Handbook of virtual environment technology*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, pp. 493–518.
- Golledge RG. (1999) Human wayfinding and cognitive maps. In *Wayfinding behavior*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press, pp. 5–45.
- Allen B. Individual differences and the conundrums of user-centered design: Two experiments. *Journal of the American Society for Information Science* 1999; 51:508–20.
- Tolman EC. Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review* 1948; 189:208–55.
- Kitchin RM. Cognitive maps: What are they and why study them? *Journal of Environmental Psychology* 1994; 14:1–19.
- Ishikawa T, Montello DR. 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* 2006; 52:93–129.
- Burgess N. Spatial memory: How egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences* 2006; 10:551–7.
- Moeser S. Cognitive mapping in a complex building. *Environment & Behavior* 1988; 20:21–49.
- McNamara TP, Shelton AL. Cognitive maps and the hippocampus. *Trends in Cognitive Science* 2003; 7:333–5.
- McNamara TP, Rump B, Werner S. Egocentric and geocentric frames of reference in memory of large-scale space. *Psychonomic Bulletin & Review* 2003; 10:589–95.
- Liben LS. (1999) Developing an understanding of external spatial representations. In Sigel IE, ed. *Development of mental representation: Theories and applications*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, pp. 297–321.
- Creem SH, Proffitt DR. Two memories for geographical slant: Separation and interdependence of action and awareness. *Psychonomic Bulletin & Review* 1998; 5:22–36.
- Creem SH, Proffitt DR. Defining the cortical visual systems: “What,” “where,” and “how.” *Acta Psychologica* 2001; 107:43–68.
- Schölkopf B, Mallot HA. View-based cognitive mapping and path planning. *Adaptive Behavior* 1995; 311:348–3.
- Mallot HA, Gillner S. Route navigating without place recognition: What is recognized in recognition-triggered responses? *Perception* 2000; 29:43–55.
- Loomis JM, Blascovich JJ, Beall AC. Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers* 1999; 31:557–64.
- Witmer BG, Bailey JH, Knerr BW. Virtual spaces and real world places: Transfer of route knowledge. *Human-Computer Studies* 1996; 413:428–45.
- Waller D, Hunt E, Knapp D. The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1998; 129:143–7.
- Richardson AE, Montello DR, Hegarty M. Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & Cognition* 1999; 27: 741–50.
- Foreman N, Stirk J, Pohl J, et al. Spatial information transfer from virtual to real versions of the Kiel locomotor maze. *Behavior Brain Research* 2000; 112:53–61.
- Witmer BG, Kline P. Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1998; 7:144–67.
- Waller D, Knapp D, Hunt E. Spatial representations of virtual mazes: the role of visual fidelity and individual differences. *Human Factors* 2001; 43:147–58.
- Stankiewicz BJ, Kalia AA. Acquisition of structural versus object landmark knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance* 2007; 33:378–90.
- Meijer, F, Geudeke, BL, van den Broek, EL. Navigating through virtual environments: Visual realism improves spatial cognition. *CyberPsychology & Behavior* 2009; 12: 517–21.
- Wilson PN, Foreman N, Gillett R, et al. Active versus passive processing of spatial information in a computer-simulated environment. *Ecological Psychology* 1997; 9:207–22.
- Wallet G, Sauzéon H, Rodrigues J, et al. (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 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '08)*, Bordeaux, France, pp. 175–8.
- Wallet G, Sauzéon H, Rodrigues J, et al. Virtual/real transfer of spatial learning: Impact of activity according to the retention delay. *Studies in Health Technology and Informatics—Annual Review of CyberTherapy & Telemedicine* 2010; 154:145–9.
- Péruch P, Vercher JL, Gauthier GM. Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology* 1995; 7:1–20.
- Jinsun Hahm MA, Kanghee Lee MA, Seung-Lark Lim MA, et al. Effects of active navigation on object recognition in virtual environments. *CyberPsychology & Behavior* 2007; 10:305–8.
- Wilson PN. Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or memory for objects. *Environment & Behavior* 1999; 31:752–63.
- Gaunet F, Vidal M, Kemeny A, et al. Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research* 2001; 11:409–20.

36. Wilson P, Péruch P. The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desk-top virtual environment. *Current Psychology of Cognition* 2002; 21:601–33.
37. Brooks BM, Attree EA, Rose FD, et al. The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory* 1999; 7:65–78.
38. Carassa A, Geminiani G, Morganti F, et al. Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: The effects of efficient exploration. *Cognitive processing* 2002; 3:65–81.
39. Péruch P, Wilson P. Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing* 2004; 5:218–27.
40. Guilford JP, Zimmermann WS. (1981) *Guilford–Zimmerman Aptitude Survey: Manual of instructions and interpretations*. Minneapolis, MN: Consulting Psychologists Press.
41. Vandenberg SG, Kuse AR. Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual & Motor Skills* 1978; 47:599–604.
42. Jansen-Osmann P, Schmid J, Heil M. Wayfinding behavior and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of the environmental structure. *Swiss Journal of Psychology* 2007; 66:41–50.
43. Brooks BM, Rose FD. The use of virtual reality in memory rehabilitation: Current findings and future directions. *NeuroRehabilitation* 2003; 18:147–57.

Address correspondence to:

Grégory Wallet  
Université Victor Segalen Bordeaux II  
Laboratoire Cognition et Facteurs humains (EA-487)  
Bâtiment 1A  
146 rue Léo Saignat  
33076 Bordeaux Cedex, France

E-mail: gregwallet@free.fr



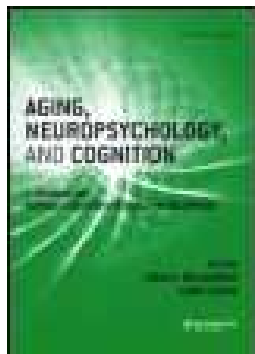


This article was downloaded by: [194.199.1.253]

On: 01 February 2013, At: 02:12

Publisher: Routledge

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Aging, Neuropsychology, and Cognition: A Journal on Normal and Dysfunctional Development

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/nanc20>

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

Mathieu Taillade <sup>a</sup>, H el ene Sauz eon <sup>a</sup>, Marie Dejos <sup>a</sup>, Prashant Arvind Pala <sup>a</sup>, Florian Larrue <sup>a</sup>, Gr egory Wallet <sup>a</sup>, Christian Gross <sup>b</sup> & Bernard N'Kaoua <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universit e Bordeaux Segalen, Laboratoire EA 4136, Handicap & Syst eme Nerveux, Bordeaux, France

<sup>b</sup> Universit e Bordeaux Segalen, CNRS UMR 5293, Institut des maladies neurod eg en eratives, Bordeaux, France

Version of record first published: 17 Aug 2012.

**To cite this article:** Mathieu Taillade , H el ene Sauz eon , Marie Dejos , Prashant Arvind Pala , Florian Larrue , Gr egory Wallet , Christian Gross & Bernard N'Kaoua (2012): Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application, *Aging, Neuropsychology, and Cognition: A Journal on Normal and Dysfunctional Development*, DOI:10.1080/13825585.2012.706247

**To link to this article:** <http://dx.doi.org/10.1080/13825585.2012.706247>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae, and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings,

demand, or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

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

**Mathieu Taillade<sup>1</sup>, H el ene Sauz eon<sup>1</sup>, Marie Dejos<sup>1</sup>, Prashant Arvind Pala<sup>1</sup>, Florian Larrue<sup>1</sup>, Gr egory Wallet<sup>1</sup>, Christian Gross<sup>2</sup>, and Bernard N’Kaoua<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universit e Bordeaux Segalen, Laboratoire EA 4136, Handicap & Syst eme Nerveux, Bordeaux, France

<sup>2</sup>Universit e Bordeaux Segalen, CNRS UMR 5293, Institut des maladies neurod eg en eratives, Bordeaux, France

## 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

---

Address correspondence to: H el ene Sauz eon, Laboratoire EA 4136, Handicap & Syst eme Nerveux, Bordeaux, France. E-mail: [helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr](mailto:helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr)

---

of self-reported questionnaires, since older adults showed difficulties in estimating their everyday wayfinding problems.

**Keywords:** 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 Survey<sup>1</sup>) and environmental cues (Allen, 1999; 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). Spatial navigation and learning are demonstrated as involving a large network of structures, including

---

<sup>1</sup> 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; and (iii) Survey knowledge, also called 'Cognitive Map' is a map-like and allocentric representation of spaces (Montello, 1998; O'Keefe & Nadel, 1978; Siegel & White, 1975; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982).

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).

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 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: Head & Isom, 2010; Jansen et al., 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, and 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 VR-based studies, three studies have

investigated age differences in navigation tasks within a virtual environment (VE) (Head & Isom, 2010; Iaria et al., 2009; Lövdén et al., 2005), while two 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 et al., 2005; Kalia, Legge, & Giudice, 2008). 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 and 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. So, the transfer of spatial knowledge from real to VEs may be possible in older adults, without cancelling of their 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'. A such conclusion 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). Importantly, 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 (likely related to aging changes in these neural structures, see the meta-analysis by Raz, 2000). Yet, it must still be established whether the age-related spatial memory and navigation difficulties observed in more realistic 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 simulators.<sup>2</sup> Participants also had to rate their New Technology (NTIC) experience with computers and computer games (Moffat et al., 2001).<sup>3</sup> 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.

### *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.

---

<sup>2</sup> 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).

<sup>3</sup> This includes three items that were rated from 0 to 7; the maximum score was 21 for each participant.

**TABLE 1.** Characteristics of the participants

	Young group (mean±SD)	Older group (mean±SD)	<i>t</i> (45)
<i>N</i>	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****
<i>Corsi Span Test</i>	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.

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

### ***Everyday Visuo-Spatial Difficulties (EVSD)***

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 VE was a replica of the district near Bordeaux's hospital. It was created using the

**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**	–

*Note:* 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); \*\*\*\* $p < .0001$ ; \*\*\* $p < .001$ ; \*\* $p < .01$ ; \* $p < .05$ .

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 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); (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-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 (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.

## 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.

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.

### VR-based Performances

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

**TABLE 3.** Participant's scores on the Neurocognitive Assessments and Questionnaires

Variables		Young group (mean±SD)	Older group (mean±SD)	<i>t</i> (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***
	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****
VS-EF	<i>Backward Corsi Span Test</i>	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

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

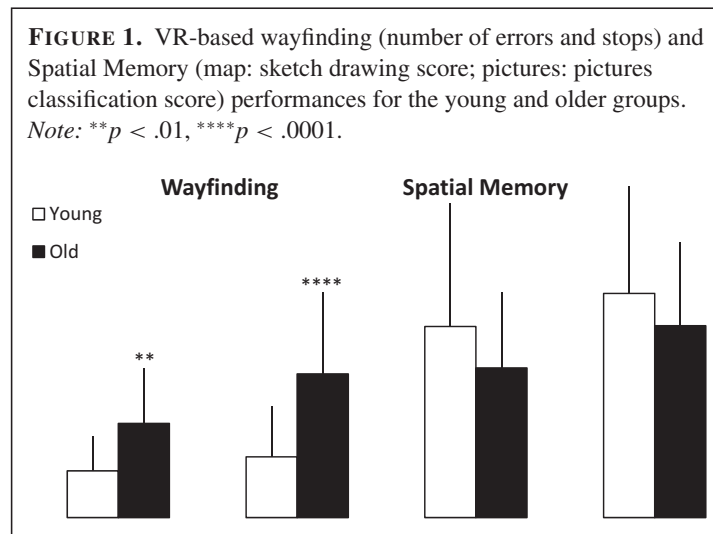
between the conditions were tested in an analysis of variance (ANOVA) (made up of two age groups) that used the following within-subject dependent variables: the number of direction errors (wayfinding task), the number of stops (wayfinding task), the picture classification scores and the sketch-map scores.<sup>4</sup> The second analysis examined the effects of age on the correlations between each one of the VR-based spatial learning performances and neurocognitive 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) (Tacconnat, Clarys, Vanneste, Bouazzaoui, & Isingrini, 2007).

### 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).

<sup>4</sup> As suggested by a reviewer, possible mediating effects of age-related differences in the NTIC or in the Vocabulary scores on the VR-based performances have been assessed with ANCOVA analyses. They revealed no significant mediating effect ( $p > .05$ ).



### Relationships between VR-based Performances and Neuro-cognitive Scores (VS-M, VS-EF, and EVSD) (Table 4)

Concerning the VS-M measures, wayfinding errors were negatively correlated only with the recognition test of the WMS-III ( $r = -.43$ ,  $p < .01$ ). When the age factor was partialled out, this correlation was not significant ( $r = -.27$ ,  $p > .06$ ). Wayfinding stops were negatively correlated in the Immediate Recall Test of the WMS-III ( $r = -.35$ ,  $p < .05$ ), the Delayed Recall Test of the WMS-III ( $r = -.46$ ,  $p < .01$ ), and the Recognition Test of the WMS-III ( $r = -.42$ ,  $p < .01$ ). 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.

For VS-EF measures, the wayfinding errors were significantly correlated with the Mental Rotation Test ( $r = -.33$ ,  $p < .05$ ), the Backward Corsi Span Test ( $r = -.32$ ,  $p < .05$ ), the TMT B ( $r = .40$ ,  $p < .01$ ), the Raven's Matrices Test ( $r = -.54$ ,  $p < .0001$ ), and the Digit Symbol Coding Test ( $r = -.36$ ,  $p < .05$ ). When the age factor was partialled out, only the correlation with the Raven's Matrices remained significant ( $r = -.35$ ,  $p < .05$ ). Wayfinding stops were significantly correlated with the Mental Rotation Test ( $r = -.29$ ,  $p < .05$ ), the Backward Corsi Span Test ( $r = -.42$ ,  $p < .01$ ), the TMT part B ( $r = .32$ ,  $p < .05$ ), the Raven's Matrices Tests ( $r = -.53$ ,  $p < .0001$ ), and the Digit Symbol Coding Test ( $r = -.39$ ,  $p < .01$ ). When age was partialled out, only the correlation with the Backward Corsi Span Test remained significant ( $r = -.35$ ,  $p < .05$ ).

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

**TABLE 4.** (a) Correlations between the VR-based spatial learning tasks and neuro-cognitive scores (VS-M, VS-EF, and EVSD); (b) 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
(a)												
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
(b)												
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 VR	Map	0.14	0.04	0.19	0.13	0.11	-0.21	0.11	-0.16	0.14	-0.1	0.04
	Pictures	-0.01	0.02	0.09	0.21	0.23	-0.23	0.32*	-0.14	-0.06	-0.28*	-0.16

*Note:* 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); \*\*\*\* $p < .0001$ ; \*\* $p < .01$ ; \* $p < .05$ .



classification task was correlated with the Raven's Matrices Test ( $r = .35$ ,  $p < .05$ ), even after age was partialled out ( $r = .32$ ,  $p < .05$ ).

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 ( $r = .08$ ,  $p > .500$ ); however, this correlation was significant when the age factor was partialled out ( $r = .32$ ,  $p < .05$ ). Wayfinding stops were also correlated with the Skelton object memory subscore ( $r = .29$ ,  $p < .05$ ) even after age was partialled out ( $r = .29$ ,  $p < .05$ ).

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 ( $r = -.28$ ,  $p < .05$ ).

## 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 VEs, where participants had to either navigate toward different targets from several positions (Foreman et al., 2005; Head & Isom, 2010; Iaria et al., 2009; Kalia et al., 2008; Lövdén, et al., 2005) or repeat previously learned routes (Head & Isom, 2010; Jansen et al., 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 VE (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) measures.<sup>5</sup> 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).

---

<sup>5</sup> 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.

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 (e.g., 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 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., Li, Lindenberger, Freund, & Baltes, 2001; Lövdén et al., 2005). 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, and 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 in a realistic VE 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.

Original manuscript received 5 January 2012

Revised manuscript accepted 20 June 2012

First published online 17 August 2012

## 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, MD: 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*, 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, NY: 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*, 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*, 340–375.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Reviews, 19*, 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*, 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, R. J. (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*, 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*, 49–58.
- Holtzer, R., Stern, Y., & Rakitin, B. C. (2005). Predicting age-related dual-task effects with individual differences on neuropsychological tests. *Neuropsychology, 19*, 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*, 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 non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, *37*, 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, Tucson, AZ.
- 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. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, *2*, 117–134.
- Kirasic, K. C., Allen, G. L., & Haggerty, D. (1992). Age-related differences in adults' macrospatial cognitive processes. *Experimental Aging Research*, *18*, 33–39.
- 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.
- 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.
- 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*, 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*, 557–564.
- Lövdén, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., Kr ger, A., & Lindenberger, U. (2005). Environmental topography and postural control demands shape aging-associated decrements in spatial navigation performance. *Psychology and Aging*, *20*, 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*, 1503–1514.
- 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., 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.
- 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.
- 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.

- 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, NY: Oxford University Press.
- Newman, M. C., & Kaszniak, A. W. (2000). Performance on a Human Analog of the Morris Water Maze. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7, 86–93.
- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford, UK: 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, 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, 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 F.I.M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition – II* (pp. 1–90). Hillsdale, NJ: 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, The Netherlands: Elsevier.
- Sauzéon, H., Claverie, B., & N'Kaoua, B. (2006). Age differences in the organization and acquisition-forgetting processes in a multi-free-recall task. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition*, 18. Retrieved from <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, 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, 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.
- Spiers, H. J. (2008). Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia*, 46, 2106–2108.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17, 618–626.
- Tacannat, 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, 1–6.
- 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, 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*, 385–405.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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*, 138–146.

# Age-Related Wayfinding Differences in Real Large-Scale Environments: Detrimental Motor Control Effects during Spatial Learning Are Mediated by Executive Decline?

Mathieu Taillade<sup>1,2</sup>, H el ene Sauz eon<sup>1,2,3\*</sup>, Prashant Arvind Pala<sup>1,2</sup>, Marie D ejos<sup>1,2</sup>, Florian Larrue<sup>4</sup>, Christian Gross<sup>5</sup>, Bernard N'Kaoua<sup>1,2,3</sup>

**1** Universit e Bordeaux, Handicap et syst eme nerveux, EA 4136, Bordeaux, France, **2** INSERM, IFR Handicap, Handicap et syst eme nerveux, EA 4136, Bordeaux, France, **3** Inria, Equipe Phoenix, Talence, France, **4** Inria, Equipe Potioc - LaBri, Talence, France, **5** Universit e Bordeaux, Institut des maladies neurod eg en eratives - UMR 5293, Bordeaux, France

## Abstract

The aim of this study was to evaluate motor control activity (active vs. passive condition) with regards to wayfinding and spatial learning difficulties in large-scale spaces for older adults. We compared virtual reality (VR)-based wayfinding and spatial memory (survey and route knowledge) performances between 30 younger and 30 older adults. A significant effect of age was obtained on the wayfinding performances but not on the spatial memory performances. Specifically, the active condition deteriorated the survey measure in all of the participants and increased the age-related differences in the wayfinding performances. Importantly, the age-related differences in the wayfinding performances, after an active condition, were further mediated by the executive measures. All of the results relative to a detrimental effect of motor activity are discussed in terms of a dual task effect as well as executive decline associated with aging.

**Citation:** Taillade M, Sauz eon H, Arvind Pala P, D ejos M, Larrue F, et al. (2013) Age-Related Wayfinding Differences in Real Large-Scale Environments: Detrimental Motor Control Effects during Spatial Learning Are Mediated by Executive Decline? PLoS ONE 8(7): e67193. doi:10.1371/journal.pone.0067193

**Editor:** Linda Chao, University of California, San Francisco, United States of America

**Received:** December 11, 2012; **Accepted:** May 15, 2013; **Published:** July 2, 2013

**Copyright:**   2013 Taillade et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Funding:** The authors have no support or funding to report.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

\* E-mail: helene.sauzeon@u-bordeaux2.fr

## Introduction

Large-scale spatial abilities are essential for everyday living activities [1]. Their decline with cognitive aging has been the scope of many recent studies, notably due to the development of Virtual Reality (VR) devices (for a review, see [2,3]). Various cognitive factors have been identified as contributing to aging declines, such as the hippocampal-memory factors relative to spatial learning, but also the fronto-executive factors relative to path planning and execution (for a review, see [2,3]). None of the previously published aging studies have specifically addressed the role of active motor exploration (compared to passive exposure) in age-related differences occurring in spatial behaviors in large-scale environments. Yet, in young adults, an active/passive effect is recognized as having an influence on navigation performances (for a review, see [4]). This issue is thus critical for VR-based aging studies, particularly when we consider that older adults have perceptual and sensorimotor difficulties (for a review, see [5]). Hence, the aim of this study was to evaluate the effect of motor control during VR-based spatial learning on the age-related differences in subsequent navigational and spatial memory performances, and then to study their connections to measures of executive and memory functioning.

Large-scale spatial skills, defined as the ability to learn and navigate in large spaces, have been the focus of numerous VR-based studies [4,6,7]. VR is particularly relevant to simulate realistic large-scale 3D spaces and, thus to overcome the lack of ecological validity of classical laboratory-based visuospatial tests

[8,9]. Spatial learning and wayfinding performances are probably the most representative of navigational behaviors in large-scale environments. Spatial learning can be defined as the process of spatial knowledge acquisition in large-scale spaces. Classical models propose a three-stage process (based on spatial knowledge levels) [10]: (1) the "landmark" (local or distal salient objects) level is acquired first, followed by (2) the "route" level (sequence of places and decisions) and, finally by (3) the "survey" knowledge level (also called configurational or directional knowledge). Originally described as sequential processing, recent findings suggest that survey knowledge can be acquired early, depending on the person's sense of direction [11,12,13]. Many tasks address spatial knowledge acquisition, such as the picture classification task in which pictures must be arranged based on a given route (e.g., [14,15]), landmark association and orientation decision tasks [15] for route level knowledge, the map drawing task (e.g., [14,16]) or pointing tasks (direction and distance toward invisible targets; e.g., [17]) for survey level knowledge. According to Byrne, Becker and Burgess [18], the hippocampus and temporal lobe provide a long-term allocentric representation of space (i.e., also called survey representation), whereas the parietal lobes provide an egocentric representation of space.

Wayfinding 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 [19,20] and is likely dependent on executive functioning, such as planning abilities and decision making [1,21]. Indeed, prefrontal cortex activations are found in relation with goal proximity [22],

or with the planning and monitoring processes during navigation [7]. For this reason, wayfinding is seen as a strategic navigation behavior that requires the use of spatial knowledge in order to plan the correct path toward a specific target [20,23]. Therefore, wayfinding is considered to be strongly dependent on both spatial memory and executive functioning [1,3].

An age-related decline is widely reported in wayfinding as well as in spatial learning; this includes an age-related decline in landmark, route and survey knowledge acquisition in VR-based studies. However, this decline is mostly observed in maze-like environments, rather than in naturalistic large-scale spaces (for a review, see [2,3]). Among the already published studies based on a realistic environment, most have investigated age-related differences in navigation tasks within a virtual environment (learning and recall phases in the VE [24,25,26,27,28,29], while very few have investigated age differences in navigation tasks that require the use and transfer of spatial knowledge acquired in a VE to subsequently perform a navigation task under real conditions [21,30,31]. Interestingly, studies using transfer tasks reported an age-related effect on the wayfinding performances [21,30,31], but failed to find this effect on the spatial memory performances (route and survey knowledge measures) [21,30]. Taillade et al. [21] and Foreman et al. [30] showed differences on wayfinding performances between younger and older adults but no difference for spatial memory tasks. Foreman et al. [30] studied the transfer of spatial knowledge from a virtual shopping mall to its real version. Taillade et al. [21] used a much larger VE than the former study, including measures assessing the efficiency of the planned routes in a wayfinding task (direction errors observed and stops to choose the directions). Additionally, they reported that the wayfinding difficulties experienced by the older adults were strongly related to their declines in the executive and spatial memory functioning measures (assessed by conventional paper-pencil tests), whereas the wayfinding performances of the younger adults were only mediated by the executive measures. Based on these results, these authors proposed that the spared spatial memory performances in the elderly adults are the result of a benefit arising from a re-test learning effect due either to direct re-exposure to the environment during the wayfinding task or by indirect re-exposure during the memory tasks (picture classification and map drawing task). This assumption was supported by the association of a decline in the wayfinding task with both a memory and executive decline, suggesting that the elderly adults completed their spatial learning during the transfer task. In other words, during this task, the older adults carried out path planning or navigation monitoring (path progression, spatial updating, etc.) in the real condition by prolonging the spatial information encoding phase, thus rendering the task more difficult for them. When considered together, the elderly subjects performed as well as the younger subjects on the spatial memory tasks, but did not perform as well on the wayfinding task.

An important issue that is often overlooked in VR-based aging studies is the role played by the motor activities engaged during the spatial learning phase for controlling the VR interfaces. The use of a motor interface, such as a mouse or a joystick (or even a steering wheel for a driving simulator), have long been used as a tool to enhance spatial learning or wayfinding performances (for review, see [4]). According to the distinction between physical vs. cognitive (referring to attention, decision making and mental manipulation, according to Chrstil and Warren's proposal [4] activity during environment exploration by Wilson et al. [32] the specific capture of motor activities can refer to comparisons between the two VR exploration conditions: (1) motor passive navigation (the subject visualizes a pre-recorded route in a virtual

environment without moving or making decisions), and (2) motor active navigation (the subject moves using a motor interface while following directions given by an experimenter in order to follow a given route). This comparison is usually labeled *active exploration or navigation effect* (for a review, see [4]).

For the younger adults, the active conditions had a positive effect on the wayfinding performance based on a virtual-real transfer task [14,33,34,35], whereas contradictory results were found for the spatial learning performances relative to the different levels of spatial knowledge (landmark, route or survey) (e.g., *for a positive effect*, see [36,37,38], *for no effect*, see [39,40,41,42,43], *for a negative effect*, see: [44]). Accordingly, it could be expected that active exploration would have a positive effect on the wayfinding performances of the younger adults, whereas it is more difficult to determine the effect with regards to the three-levels of spatial knowledge. As highlighted by Chrstil and Warren [4], the inconsistent results concerning the active-passive effect might be due to a discrepancy in the experimental design, notably with regards to the manipulation of the motor activity (e.g., treadmill, steering wheel, joystick, all differing in terms of sensorimotor stimulation) and its confounding effects with psychological activity (decision making, attention and mental manipulation).

Regarding the aging effect, to the best of our knowledge, no study has directly addressed the age-related difference in VR-based wayfinding tasks with respect to an active/passive exploration manipulation. This is surprising since motor control is critical for VR aging study designs. In fact, only the study by Plancher et al. [45], using a driving simulator, assessed the role of active (driver) and passive (passenger) learning in age-related differences on episodic memory measures (details relative to objects, and spatial information such as the position of the objects relative to the body and along the route, and direction changes relative to the objects). They found no significant effect of the "driving" vs. "passenger" conditions on the memory performances. The lack of benefit is interpreted as a dual task effect during the encoding phase in which participants do not have enough resources in the active condition to pay attention to every detail in the environment. A similar explanation is also advanced in other aging studies testing the possible negative effect of sensorimotor control on spatial memory performances: Lövdén et al. [28] found that walking on a treadmill without any help to maintain balance had a negative effect on the spatial memory performances of the older participants in a virtual museum, but not for the younger participants. The authors concluded that the sensorimotor control required for the motor activities could place the participants in a dual-task situation, for which robust age-related difficulties are usually reported in a multi-task condition, involving simultaneous walking and cognitive activities (e.g., [46,47,48] for example). According to the sensory deficit theory of aging, age-related deficits in sensory processing play a major role in age-related cognitive decline ([49], for a review, see [5]). In this vein, older adults may tend to "prioritize" sensorimotor control (requiring working memory resources) over cognitive control when dual "cognitive-sensorimotor" control is necessary [47,50]. This phenomenon, in addition to executive memory decline, could also contribute to the general decline in the spatial memory and wayfinding performances, particularly in light of an aging decline in sensorimotor information processing, including difficulties in optic flow processing [51,52], path integration processes [53] and motor control [54]. Note that this dual task effect could be different between route and survey acquisition since the acquisition of route knowledge is more automatic than the acquisition of survey knowledge [4].

Hence, the aim of this study was to assess age-related differences in terms of “active-passive” motor exploration in spatial memory and wayfinding performances in a large district of the city of Bordeaux, and to study their connections with the mediating role of age-related declines in spatial, memory, executive abilities. According to the sensory deficit hypothesis, we expected that sensorimotor control in the active condition is more costly in terms of cognitive resources for elderly adults than in passive condition.

## Methods

### Participants

Thirty younger adults (mean age = 23.12;  $SD = 2.97$ ; age range: 18–30) and thirty older adults (mean age = 64.50;  $SD = 3.68$ ; age range: 58–72) participated in this study. The inclusion criteria for both the younger and older adults were the absence of foreknowledge of the district, being right handed and to have no past or present neurologic disorders. Also, all of the participants were volunteers and native French speakers. 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 so as to not lengthen the experiment duration (which was already long with the virtual experiment and the neuro-cognitive assessment). The younger adults were recruited at the University of Bordeaux and the older adults were recruited from a Senior University in Bordeaux (“Université du Temps Libre”). In addition, the inclusion criteria for the older participants also included not having a global cognitive deficiency and therefore, the older subjects were tested with the Mattis Dementia Rating Scale as an exclusion test (exclusion for a score  $< 129$ ).

Even if this study does not meet the criteria for the CPP-III assessment, each participant signed a consent form in order to obtain the approval of each participant, as recommended by the CPP-III and the Helsinki convention. This document explains the process and the reasons for the study and how the behavioral data collected will be used. A written informed consent was obtained from each participant. All data were analyzed anonymously.

The younger and elderly groups were divided between “active” and “passive” groups. All of the subjects had to complete a French version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ; [55]) immediately after the learning phase in the VE. This questionnaire measures the severity of sickness induced by 3D simulators. 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”. The weighted totals of the scale scores and conversion formulas are the same as those used by Kennedy et al. [55]. Participants also had to rate their New Technology (NTIC) experience with computers and computer games ([56]). This includes three items that were rated from 0 to 7; the maximum score was 21 for each participant. The Everyday Visuospatial Difficulties (EVSD) survey along with the Spatial Orientation questionnaire (wayfinding and object memory subscores; [57]) and the French adaptation of the Mill Hill Vocabulary Scale [58] were also administered.

There were no significant inter-group differences between the active and passive conditions for age ( $p > .600$ ), education level ( $p > .200$ ), the Mill Hill Vocabulary test ( $p > .800$ ), the Skelton Wayfinding score ( $p > .900$ ), the Skelton Object Memory score ( $p > .900$ ), the NTIC ( $p > .200$ ) and the SSQ ( $p > .400$ ) scores. There was no interaction between the age and navigation (active vs. passive) conditions with regards to the education level

( $p > .200$ ), the Mill Hill Vocabulary test ( $p > .800$ ), the Skelton Wayfinding score ( $p > .900$ ), the Skelton Object Memory score ( $p > .900$ ), the NTIC ( $p > .200$ ) and the SSQ ( $p > .400$ ) scores.

There was no age effect for education level ( $p > .400$ ) or the Skelton Object Memory score ( $p > .200$ ). There was a significant age effect for the Mill Hill Vocabulary test ( $p < .0001$ ), the Skelton Wayfinding score ( $p < .05$ ), and the NTIC ( $p < .0001$ ). The younger adults had higher scores on the Skelton Wayfinding questionnaire, indicating that they report more wayfinding difficulties than the older adults, in agreement with 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.

The characteristics of the subjects for each group are presented in Table 1.

### 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 [14,21,33,34,35,59]. The VE was a replica of the district near the Bordeaux hospital. It was created using the Virtools© software. Significant landmarks (signposts, signs, and urban furniture) were included in the VE. The apparatus used in the VR room was a Dell© personal computer (3 GHz, 5 Gb RAM) with a NVIDIA© Quadro FX 4400 graphics card, a F1+© projector, a 2×1.88 meter screen. In addition, in order to actively explore the VE, a Thrustmaster joystick was programmed with three degrees of liberty for displacements: forward translational movements (push); (2) angular rotations to the left or (3) to the right (to lean left or right in a 45° angle).

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); more precisely, during the 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 (Figure 1); (3) and *a restitution phase*, the participants performed after a 10-minute retention interval two kinds of tasks as follows: wayfinding task and spatial memory tasks.

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 the screen displaying the travel (as in our previous studies [14,33,34,35]). The same verbal instructions were given in both the active and passive conditions.

**Wayfinding task.** The participants were asked to replicate the path they learned in the VE in the real Bordeaux district. To this end, the participants were brought to the starting point in the real district, which corresponded to the virtual one, and were asked 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 was allowed to continue on his/her way. 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 [14,21,33,34,35,60].

**Table 1.** Characteristics of the participants.

	Younger adults		Older adults		Group effects
	Active mean (SD)	Passive mean (SD)	Active mean (SD)	Passive mean (SD)	
N	15	15	15	15	
Age	23.13 (3.13)	23.20 (2.96)	64.87 (2.90)	64.07 (4.11)	$F(1,58) = 2330.48; p < .0001$
Education Level	15.33 (2.09)	15.67 (1.72)	15.87 (3.02)	14.20 (2.43)	$F(1,58) = 1.194; p > .200$
Mill Hill Vocabulary	23.40 (4.29)	23.80 (4.84)	28.47(2.33)	28.40 (3.20)	$F(1,58) = 24.367; p < .0001$
Skelton Wayfinding	27.20 (13.95)	27.33 (13.48)	19.33 (12.42)	20.00 (8.77)	$F(1,58) = 5.703; p < .05$
Skelton Object Memory	18.20 (7.04)	17.67 (6.68)	19.87 (8.12)	20.26 (5.03)	$F(1,58) = 1.471; p > .200$
NTIC	15.00 (4.63)	13.31 (4.77)	9.40 (4.00)	8.47 (2.29)	$F(1,58) = 25.239; p < .0001$
SSQ	83.32 (100.05)	219.73 (238.31)	194.70 (271.31)	143.72 (154.23)	$F(1,58) = 0.084; p > .700$

doi:10.1371/journal.pone.0067193.t001

**Spatial memory tasks.** The participants carried out two tasks. The first was a *map drawing* task, participants are known to have strong performances when they have developed a good spatial cognitive map of the environment [14,33,34,35,59,60]: 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. To help

the participants, an arrow was provided on a blank sheet of paper to show the starting point. Then, the participants were asked to draw starting from this position, the configurational sketch of the path by way of an outline made up of connected segments. The score included two criteria: the presence of a loop and the number of correct directions given from the beginning of the path. The maximum possible score is 11. The second task was a *picture*



**Figure 1. Representation of the district area and of the route used for the experiment.**  
doi:10.1371/journal.pone.0067193.g001

classification task, participants are known to have strong performances when they have well-developed route knowledge of the performed path [14,33,34,35,60]. The goal of this task was to chronologically order 12 pictures corresponding to different points of views of the district encountered along the route. The score is a sequence score: 1 point is given if the picture 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 possible 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 order of the tasks was counterbalanced between the subjects.

### Neuro-cognitive Assessment

Several neuropsychological tests were administered to each participant to estimate their cognitive functioning, assessing three cognitive domains: visuospatial (VS) abilities, visuospatial memory (VS-M), and executive functioning (EF). These tests were administered before and after the training sessions and the learning test in the VR, and their order was counterbalanced between the subjects. Composite scores relative to each one of three domains were calculated.

**Visuospatial (VS) functioning included.** (1) Mental rotation abilities that are probed with the Mental Rotation Test (MRT, by Vandenberg and Kuse [61]); this test requires participants to mentally rotate 3-dimensional figures in order to make a similarity judgment between them; (2) visuospatial working memory, which is probed with the Backward Corsi Span Test (BCS) as part of the WMS-III (Wechsler Memory Scale-III; [62]); this test requires participants to recall, in reverse order, the sequence of squares to which the experimenter is pointing. These squares are positioned on a “tray”.

**Visuospatial Memory (VS-M) functioning included.** (1) the immediate free recall and (2) the delayed recognition performances from the Visual Reproduction Test (WMS-III; [62]). Participants taking the immediate recall test must draw five geometrical figures after a retention interval of 10 seconds. For the delayed recognition test, after a retention interval of 20 minutes, the participants must make Yes/No recognition decisions for the figures presented (previously studied figures mixed with unstudied figures).

**Executive Functioning (EF) included.** (1) cognitive flexibility with part B of the Trail Making Test (TMT B; [63]) and (2) inductive reasoning abilities with the Raven’s Matrices Test (RMT standard form; [64]). Participants taking part B of the TMT must draw a line in order to connect letters and numbers in alphabetic order and in increasing order, respectively (letters and numbers are alternated). The RMT is composed of sixty problems with growing difficulty in terms of inductive inferences. The problems require the participants to choose between six or eight figures that can be used to complete a figure or a series of geometrical figures. The participants have 25 minutes to complete the problems.

### Results

The results are organized into three parts. The first refers to the VR-based results in the younger and the older adults from the active/passive exploration manipulation within the virtual environment. The second presents the age-related differences that occurred in the three neuro-cognitive domains (VS; VS-M; EF) assessed with conventional paper-pencil tests. And finally, the third focuses on the correlation results between the VR-based perfor-

mances and the neurocognitive measures expressed by composite z scores.

### VR-Based Performances

Two-way ANCOVA [2 (age group: younger adults; older adults) x 2 (learning condition: active; passive)] analyses were carried out on each spatial learning and navigation measure using the NTIC score as a covariate variable. As no significant mediating effect for the NTIC variable was observed ( $p > .05$ ) for each of the studied dependant measures, two-way ANOVA [2 (age group: younger adults; older adults) x 2 (learning condition: active; passive)] analyses were carried out.

**Wayfinding task.** For the error scores, the results showed a significant effect of age [ $F(1,56) = 19.512$ ;  $p < .0001$ ]: the younger participants made fewer errors than the older adults. No effect of learning condition [ $F(1,56) = 0.439$ ;  $p > .500$ ] was obtained; however, the interaction between age and learning condition was significant [ $F(1,56) = 7.563$ ;  $p < .05$ ]: the active participants in the younger group made fewer errors whereas more errors were made in the older group. Age differences were higher in the active condition ( $p < .0002$ ) compared to the passive condition ( $p < .03$ ) (Figure 2).

For the stop scores, a significant effect of age [ $F(1,56) = 28.886$ ;  $p < .0001$ ] was found where the younger participants made fewer stops than the older adults. Also, only the interaction between age and learning condition [ $F(1,56) = 10.788$ ;  $p < .01$ ] was significant: the active participants made fewer stops in the young group but more stops in the older group. Age differences were higher in the active condition ( $p < .0001$ ) compared to the passive condition ( $p < .03$ ) (Figure 2).

**Spatial memory tasks.** For the map task, the results showed no significant effect of age ( $F(1,56) = 0.479$ ;  $p > .400$ ), a significant effect of navigation mode ( $F(1,56) = 6.742$ ;  $p < .05$ ) and no significant interaction between them ( $F(1,56) = 0.187$ ;  $p > .600$ ) (Figure 3).

For the picture classification task, the results showed no significant effect of age ( $F(1,56) = 0.692$ ;  $p > .400$ ) and navigation mode ( $F(1,56) = 0.232$ ;  $p > .600$ ), and no significant interaction between these two factors ( $F(1,56) = 0.49$ ;  $p > .400$ ) (Figure 3).

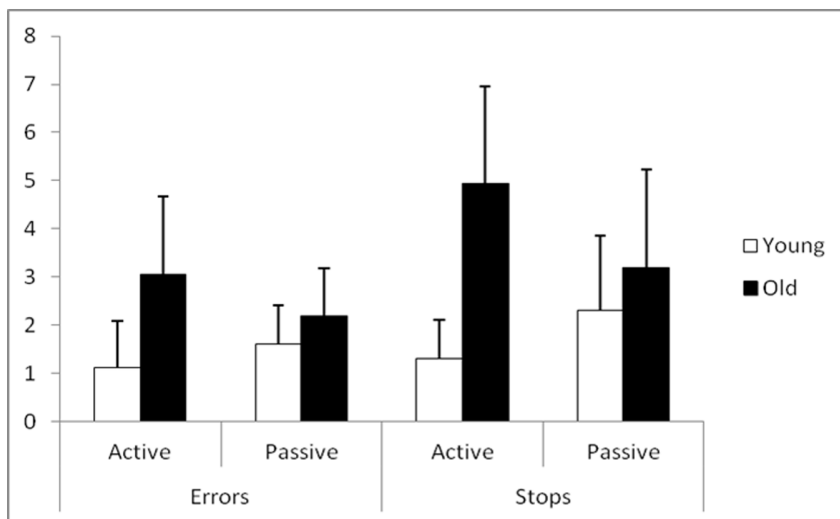
### Neuro-cognitive Assessment

Two-way ANOVA [2 (age group: younger adults; older adults) x 2 (active-passive condition: active; passive)] analyses were carried out on each neuro-cognitive measure.

All of these analyses indicated no simple or interaction effect, including the active-passive condition factor. By contrast, an age effect was significantly observed in all of the dependant measures relative to the three cognitive domains of interest for the navigation behaviors. The younger participants performed better than their older counterparts with regards to the visuospatial abilities (VS), visuospatial memory (VSM) and executive functioning (EF) measures (Table 2).

### Correlations between the Wayfinding Performances and the Neuro-cognitive Measures

To analyze the relationship between VR-based wayfinding and the spatial memory performances, on the one hand, and neurocognitive measures, on the other, according to the learning conditions (active vs. passive), we constructed composite z scores for the wayfinding and map drawing performances and for the three cognitive domains considered in our experiment. For the two wayfinding scores, a z score was calculated from the errors and stop performances to analyze the correlations between the



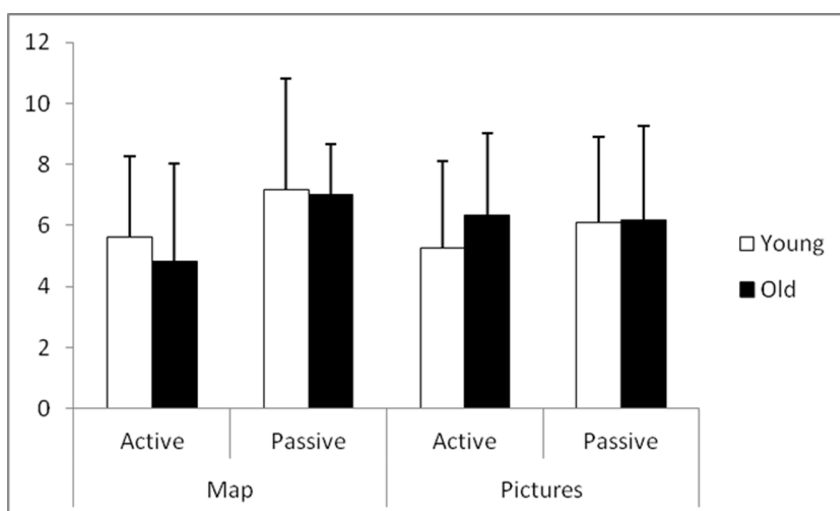
**Figure 2. Wayfinding performances as a function of age and the navigation condition.** Mean and Standard deviation for the number of Wayfinding errors and stops, according to the active and passive learning conditions and age; ANOVA (Group x Exploration) results. doi:10.1371/journal.pone.0067193.g002

wayfinding performances and the neuro-cognitive measures. The VS functioning z score was constructed with the mental rotation and BCS tests; the VS-M z score was constructed with the immediate free recall and the delayed recognition task of the WMS-III; and finally, the EF z score was constructed with the Raven's matrices and the trail making test. We calculated the correlations between age and the wayfinding z score, partialled out for each one of z scores for the neurocognitive indices. A comparison of the correlations before and after each partialling out was also done in the active and passive conditions according to Fisher's transformation procedure (with the limit values for Z at 1.96).

As indicated in Table 3, the wayfinding z score in the active condition was significantly correlated with age ( $r = .72$ ;  $p < .0001$ ). This correlation, partialled out for VS, VS-M and EF z scores,

remained significant:  $r = .58$ , ( $p < .001$ );  $r = .63$  ( $p < .0001$ ); and  $r = .46$  ( $p < .01$ ), respectively. However, the correlation comparisons indicated that, when controlled by the EF z score variable, the r value between age and the wayfinding score was significantly modified.

In the passive condition, the wayfinding z score was significantly correlated with age ( $r = .47$ ,  $p < .001$ ). This correlation, partialled out for VS, VS-M and EF z scores, was no longer significant:  $r = .15$ , ( $p > .400$ );  $r = .16$ , ( $p > .300$ ); and  $r = .36$ , ( $p > .05$ ), respectively. However, these changes with respect to the r value did not reach significance.



**Figure 3. Spatial memory performances as a function of age and the navigation condition.** Mean and Standard-deviation for the sketch drawing scores and the picture classification scores, according to the active and passive learning conditions and age; ANOVA (Group x Exploration) results. doi:10.1371/journal.pone.0067193.g003

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

NAVIGATION MODE	YOUNGER GROUP		OLDER GROUP		ANOVA (Group×Exploration) significant effects
	Active mean (SD)	Passive mean (SD)	Active mean (SD)	Passive mean (SD)	
<b>VISUOSPATIAL ABILITIES</b>					group effect:
Mental Rotation Test	8.81 (1.42)	8.56 (2.12)	7.37 (1.50)	6.25 (1.78)	F(1,56) = 22.443; p<.0001
BCS	19.12 (9.20)	17.81 (8.50)	10.37 (5.94)	9.19 (4.79)	F(1,56) = 18.842; p<.0001
<b>VISUOSPATIAL MEMORY</b>					group effect:
Mem III IR	95.25 (8.62)	98.56 (5.09)	87.19 (12.38)	85.12 (9.13)	F(1,56) = 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, 56) = 13.489; p<.001
<b>EXECUTIVE FUNCTIONING</b>					group effect:
TMT B	45.62 (16.66)	46.41 (15.70)	64.44 (22.57)	62.91 (24.20)	F(1,56) = 12.290; p<.001
Raven's Matrices Test	55.87 (2.87)	54.44 (3.78)	47.37 (4.32)	48.56 (5.02)	F(1,56) = 49.824; p<.0001

doi:10.1371/journal.pone.0067193.t002

## Discussion

To date, no study has assessed age-related differences in navigation and spatial learning tasks according to active vs. passive motor exploration manipulations. Additionally, no study has addressed the issue of age differences in the active exploration effect, in light of the mediating effect of aging decline in spatial abilities, memory or executive functioning. The results presented here provide insights on these issues.

Among the main results reported here, the first set of results show a negative effect of age on the wayfinding performances, but no negative effect of age on the spatial memory performances (map drawing and picture classification task, probing route and survey knowledge). This pattern of age differences in the wayfinding and spatial memory performances not only fully agrees with our previous study focusing on the virtual-real transfer of spatial learning in order to complete routes in the real environment [21], but also is in accordance with the study by Foreman et al. [30]. Therefore, this is consistent with our previous interpretation that the virtual-real transfer procedure means that the elderly adults have better spatial learning through the *re-test* effect, notably during the wayfinding task. An additional explanation is that the use of a virtual environment that is based on a real environment to perform a transfer task may enhance

spatial learning in older adults because these VEs closely match the physical characteristics of real environments. Older adults have many years of experience with regards to spatial learning in unfamiliar environments, which could have contributed to the long-term formation of a generally higher level of spatial knowledge (i.e., topographical schema) compared with younger people. It appears likely that the use of virtual environments based on real environments, compared to artificial environments, provides more environmental support [65], and thus activates this topographical knowledge. Subsequently, this enables the elderly adults to be more efficient in their spatial learning or even, to benefit more from the re-test effect (also see [66] for a similar interpretation of spared navigation performances in elderly persons for everyday tasks). In any case, the present results indicated that the spatial learning difficulties experienced with aging can be compensated for, whereas the learning difficulties observed for wayfinding are more robust, given the more critical role played by executive functioning in this task.

Second, it is interesting to note that for both the younger and the older participants, a detrimental effect of active learning with the joystick was observed on the map drawing task (probing the survey level) while no significant effect was observed on the picture classification task (probing the route level). This indicated that, under the active condition, motor control of a joystick worsened spatial learning, specifically in the acquisition of elaborate survey knowledge. With regards to the joystick-based active condition, similar results have been reported by Sandamas and Foreman [44]; however, other studies also report different results (e.g., *positive effect*: [36,37,38,67]; *null effects*: [68]). As stressed by Chrastil and Warren [4] and Sandamas and Foreman [44], among the main reasons for the inconsistent effects of a joystick condition, the impoverishment of motor processing as well as a less automatic mapping between motor efference and visual reafference for movement control (compared to a real legged locomotion) probably play a critical role in the resulting effect on survey knowledge acquisition, particularly for large-size environments. Indeed, passive participants could certainly focus on viewing and learning the environment layout while the active participants' efforts were divided between operating the input device, implementing directional instructions while simultaneously learning the task.

By contrast, motor control has a less deleterious effect in the acquisition of route knowledge. This is consistent with previous results showing that the manipulation of intentional/incidental

**Table 3.** Correlations between the wayfinding z scores and age (the p values are in parentheses) for the active and passive conditions, followed by the same correlations partialled out for each one of the neurocognitive z scores (VS-M z, VS-F z and EFz).

	z Wfg * Age	Partialled out for		
		VS-F	VS-M	EF
<b>Active</b>	.72 (<.0001)	.58 (<.001)	.63 (<.0001)	.46 (<.05)
<b>Z</b>		1.24	0.85	<b>2.01</b>
<b>Passive</b>	.47 (<.001)	.15 (>.400)	.16 (>.300)	.36 (>.09)
<b>Z</b>		1.56	1.52	0.61

The Z values are calculated for correlation comparisons.  
doi:10.1371/journal.pone.0067193.t003



encoding of route knowledge does not have an impact on the identification of landmarks and putting those landmarks in the correct temporal order [15]. Nevertheless, as highlighted by Chrastil and Warren [4], if some aspects of route knowledge acquisition can be as cognitively effortless as the temporal order of landmarks, some others, such as place-action association or route reproduction can be more effortful like the acquisition of survey knowledge. Similarly, idiothetic processing (locomotor efference, proprioception and vestibular information afforded by walking activity), which varies in resource demands, is sometimes demonstrated as promoting survey knowledge acquisition (e.g., [17] and for a review, see [4]). Thus, an extended measurement on all of the facets of route knowledge acquisition as well as those of survey knowledge acquisition might capture some differential effects of joystick-based active learning as a function of their respective resource demanding. Further studies are necessary for a better understanding of the influence of motor activity relative to joystick manipulation on spatial learning in VR devices.

In any case, if the survey knowledge acquisition measures are more dependent on effortful processes compared to the measures for route knowledge [4,10,11,12,13], the selective detrimental effect of motor control of a joystick can be seen as a dual task effect due to resource competition on the survey task. This conclusive result may give insights into the inconsistent findings reported in the studies on younger adults, relative to the active exploration effect, according to the different levels of spatial knowledge. Indeed, as the competition for processing resources within a dual-task depends on the allocation resource initially required for each of the two tasks [69], inconsistent findings such as null or positive active exploration effects can likely reflect spatial learning tasks that are not very resource demanding. For instance, the size of the virtual environment used is often relatively small (one building with one level and a few hallways), and therefore the survey representation acquired is not complex and probably not a resource-limited task. Hence, it is likely that the addition of the motor control condition is not critical (null effect) or, even more likely, it could be a source of self-involvement in the task for the participant, thus explaining some positive effects reported in several studies. In fact, some studies found a positive effect of motor activity on the self-involvement of the participants [70,71].

In all cases, the present results revealed the importance of assessing spatial learning abilities with virtual environments that are sufficiently large and as rich as real life environments in order to capture a dual-task effect (due to motor activity) in the subjects' spatial learning performance. In a more general manner, this means that the effects of motor activity are strongly dependent on the relationships between cognitive and motor processing during spatial learning.

Finally, and most importantly, we found a positive effect of active learning in the two wayfinding performance scores for the younger group [14,33,34,35], whereas a negative effect in these two scores was exhibited by the older group. Accordingly, as expected, an active virtual exploration of the virtual district enhances the subsequent wayfinding performances in the real condition of the younger subjects, but is detrimental for the elderly participants. This aging effect mirrors the well known increase of age-related differences in dual-task situations [72], notably in competitive situations between "cognitive control" and "motor control", such as walking and talking or memorizing [47]. This interpretation is supported by correlation results showing that when the mediating effects of executive functioning are controlled, it considerably reduces the relationship between age and the wayfinding score for the active condition. Interestingly, in the passive condition, the correlation between age and the wayfinding

performances was no longer significant when each one neurocognitive scores were controlled. This latter result is consistent with our previous results which indicated that the wayfinding difficulties observed in the virtual-real transfer procedures originate from age-related failures in the complex orchestration of multiple cognitive processes required to perform the wayfinding task ([21]; for a review, see [3]). Thus, while wayfinding difficulties are related to multiple facets of aging decline under the passive condition, they are broadly related to executive decline under the active condition as detrimental consequence of sensorimotor activity simultaneously performed with a spatial learning task.

Considered together, and compared to the passive condition, the results indicate that the age-related differences in the wayfinding performances under the active condition are overall related to an age-related decline in executive processes. This corroborated our hypothesis that the addition of motor control during spatial learning can be seen as a dual-task condition that in turn, requires the mobilization of more resource demanding processes to subsequently perform wayfinding tasks. 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 learn the configuration of a virtual museum [28]. Two conditions were compared: the participants were allowed to control their balance with hand trails in the first condition but not in the second. These two conditions showed comparable performances in the younger participants. On the contrary, the condition in which participants had to control their balance themselves induced worse spatial memory performances in the older group. According to the sensory deficit theory [49], this age-related dual task effect was explained by the sensorimotor decline for balance control [73], which in turn requires higher working memory resources and finally affects simultaneous cognitive activities. Thus, the effect of the age-related dual task reported here can be seen as a sensorimotor deficit for joystick use that induces an additional cognitive load for the elderly participants during the spatial learning phase.

Although a dual-task effect interpretation of motor activity during learning can explain the older subjects' performances, this is less the case for the younger subjects' performances. Despite an actual detrimental effect of the active condition on the survey knowledge score, the younger adults paradoxically exhibited better wayfinding performances after the active learning condition than after the passive learning condition. This apparent paradox might be due to the fact that survey knowledge was not necessary for the wayfinding task as sometimes reported in studies [20]. Therefore, one explanation of young subjects' benefit from the active condition may be that the younger adults probably adopt a route knowledge strategy based on the visual recognition of landmarks and route sequences to infer the correct path. This view is supported by the fact that an active condition worsened the survey knowledge performance but not the route knowledge performance (i.e., picture classification task). Furthermore, a wayfinding strategy based on route knowledge is likely to be much more useful in a wayfinding task that is based on path recognition from a virtual to a real condition according to the well-known transfer-appropriate processing effect in the memory domain [74]. The elderly adults may have flexibility difficulties to implement a wayfinding strategy (i.e., to prioritize a route strategy over survey or mixed survey-route strategy, as done by the younger adults). This interpretation is also proposed by Etchamendy et al. [75], who showed that when older adults have not acquired survey knowledge of the environment they are more inclined to exhibit worsened wayfinding difficulties in virtual maze tasks. This lack of flexibility to use an optimal wayfinding strategy may also be related to less

awareness of wayfinding difficulties in everyday life. Even if further evidence should support our interpretation, it could be assumed that the age-related paradoxical effect of active learning in wayfinding performances is related to an executive decline with aging in terms of a wayfinding coping strategy based on the available spatial knowledge.

To conclude, as a dual-task effect, this study is the first to provide behavioral-based evidence showing that motor activity during spatial learning reduces the acquisition of survey knowledge. The consequence of this is an increase in the age-related differences in the wayfinding performances primarily associated

with the executive factors. These findings thus stress the critical role of motor interfaces that must be taken into account in future aging studies that are based on VR devices.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: HS BN CG. Performed the experiments: MT PAP MD. Analyzed the data: HS MT. Contributed reagents/materials/analysis tools: FL HS MT. Wrote the paper: MT HS. Development of VR application: FL.

## References

- Wolbers T, Hegarty M (2010) What determines our navigational abilities? *Trends Cogn Sci* 14: 138–146.
- Moffat SD (2009) Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychol Rev* 19 (4): 478–489.
- Klencklen G, Després O, Dufour A (2012). What do we know about aging and spatial cognition? Reviews and perspectives. *Ageing Res Rev* (11): 123–135.
- Chrastil ER, Warren WH (2012) Active and passive contributions to spatial learning. *Psychon Bull Rev* 19 (1): 1–23.
- Dennis NA, Cabeza R (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. In: Craik FIM., Salthouse TA, editors: *The handbook of aging and cognition*. Psychology Press, New York and Hove. 311–372.
- Loomis JM, Blascovich JJ, Beall AC (1999) Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behav Res Methods Instrum Comput* 31 (4): 557–564.
- Spiers HJ (2008) Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia* 46: 2106–2108.
- Hegarty M, Waller D (2005) Individual differences in spatial abilities. In: Miyake A, Shah P editors. *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking*. New York: Cambridge University Press. 121–169.
- Lorenz CA, Neisser U (1986) Ecological and psychometric dimensions of spatial ability (Rep. No. 10). Emory Cognition Project, Atlanta, GA7 Emory University.
- Siegel AW, White SH (1975) The development of spatial representations of large-scale environments. In: Reese H W. editors. *Advances in child development and behavior* 10. New York: Academic Press. 9–55.
- Montello DR (1998) A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. In: Egenhofer MJ, Golledge RG editors. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. New York: Oxford University Press. 143–154.
- Ishikawa T, Montello DR (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. *Cognit Psychol* 52 (2): 93–129.
- Hegarty M, Montello DR, Richardson AE, Ishikawa T, Lovelace K (2006) Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence* 34 (2): 151–176.
- Wallet G, Sauzéon H, Arvind Pala P, Larrue F, Zheng X, et al. (2011) Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychol Behav Soc Netw* 14: 417–423.
- Van Asselen M, Fritschy E, Postma A (2006) The influence of intentional and incidental learning on acquiring spatial knowledge during navigation. *Psychol Res* 70: 151–156.
- Shelton AL, McNamara TP (2004) Orientation and perspective dependence in route and survey learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 30: 158–170.
- Waller D, Loomis JM, Haun DBM (2004) Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychon B Rev* 11 (1): 157–163.
- Byrne P, Becker S, Burgess N (2007) Remembering the past and imagining the future: A neural model of spatial memory and imagery. *Psychol Rev* 114 (2): 340–375.
- Golledge RG (1999) Human wayfinding and cognitive maps. In Golledge RG, editors. *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Press. 5–45.
- Wiener J, Büchner S, Hölcher C (2009) Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognit Comput* 9 (2): 1–14.
- Taillade M, Sauzéon H, Dejos M, Arvind Pala P, Larrue F, et al. (2012) Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 20 (3): 298–319.
- Spiers HJ, Maguire EA (2007) A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus* 17(8): 618–626.
- 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.
- Cushman LA, Stein K, Duffy CJ (2008) Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology* 71 (12): 888–895.
- Head D, Isom M (2010) Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behav Brain Res* 209 (1): 49–58.
- Iaria G, Palermo L, Committeri G, Barton JJS (2009) Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behav Brain Res* 196 (2): 187–191.
- Liu I, Levy RM, Barton JJS, Iaria G (2011) Age and gender differences in various topographical orientation strategies. *Brain Res* 1410: 112–119.
- 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. *Psychol Aging* 20 (4): 683–694.
- Meulenbroek O, Petersson KM, Voermans N, Weber B, Fernández G (2004) Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage* 22 (4): 1503–1514.
- Foreman N, Stanton-Fraser D, Wilson PN, Duffy H, Parnell R (2005) Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environ Behav* 37 (2): 275–292.
- Kalia AA, Legge GE, Giudice NA (2008). Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception* 37 (11): 1677–1699.
- Wilson P, Foreman N, Gillett R, Stanton D (1997) Active versus passive processing of spatial information in a computer simulated environment. *Ecol Psychol* 9: 207–222.
- 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. *Proc 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. *J. 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. *Stud Health Technol Inform* 154: 145–149.
- Attree EA, Brooks BM, Rose FD, Andrews TK, Leadbetter AG, et al. (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, editors. *Proceedings of the 1st European Conference on Disability, Virtual Reality, and Associated Technology*. Reading: University of Reading Press. 117–121.
- Péruch P, Vercher J, Gauthier GM (1995) Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecol Psychol* 7: 1–20.
- Brooks BM, Attree EA, Rose FD, Clifford BR, Leadbetter AG (1999) The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory* 7: 65–78.
- Cutmore TRH, Hine TJ, Maberly KJ, Langford NM, Hawgood G (2000) Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *Inter J Hum Comput Stud*, 53 (2): 223–249.
- 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. *Brain Res Cogn Brain Res* (11): 409–420.
- Foreman N, Sandamas G, Newson D (2004) Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction. *Cyberpsychol Behav* 7 (4): 451–457.
- Carassa A, Geminiani G, Morganti F, Varotto D (2002) Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: The effect of efficient exploration. *Cognit Process* (3–4): 65–81.
- Farrell MJ, Arnold P, Pettifer S, Adams J, Graham T, et al. (2003) Transfer of route learning from virtual to real environments. *J Exp Psychol Appl* (9): 219–227.
- Sandamas G, Foreman N (2007) Spatial reconstruction following virtual exploration in children aged 5–9 years: Effects of age, gender and activity-passivity. *J Environ Psychol* 27 (2): 126–134.

45. Plancher G, Nicolas S, Piolino P (2008) Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: Study in aging. *Psychol et Neuropsychia* 6 (1): 7–22.
46. Li KZH, Lindenberger U, Freund AM, Baltes PB (2001) Walking while memorizing: Age-Related Differences in Compensatory Behavior. *Psychol Sci*, 12 (3): 230–237.
47. Li KZH, Krampe RT, Bondar A (2005) An ecological approach to studying aging and dual-task performance. In: Engle RW, Sedek G, von Hecker U, McIntosh DN editors. *Cognitive limitations in aging and psychopathology*. Cambridge University Press, Cambridge, England. 190–218.
48. Riediger M, Li SC, Lindenberger U (2006) Selection, optimization, and compensation (SOC) as developmental mechanisms of adaptive resource allocations: Review and preview. In: Birren JE, Schaie KW editors. *Handbook of the psychology of aging* (6<sup>th</sup> ed.). Amsterdam: Elsevier. 289–313.
49. Lindenberger U, Baltes PB (1994) Sensory functioning and intelligence in old age: a strong connection. *Psychol Aging* 9 (3): 339–355.
50. Doumas M, Smolders C, Krampe RT (2008) Task prioritization in aging: Effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Exp Brain Res* 187 (2): 275–281.
51. Kavcic V, Fernandez R, Logan D, Duffy CJ (2006) Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain* 129 (3): 736–746.
52. Harris MA, Wolbers T (2012) Ageing effects on path integration and landmark navigation. *Hippocampus* 22: 1770–1780.
53. Allen GL, Kirasic KC, Rashotte MA, Haun DB (2004) Aging and path integration skill: Kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Percept Psychophys* 66: 170–179.
54. Trewartha KM, Endo A, Li KZH, Penhune VB (2009) Examining prepotent response suppression in aging: a kinematic analysis. *Psychol Aging* 24: 450–461.
55. Kennedy RS, Berbaum KS, 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.
56. Moffat SD, Zonderman AB, Resnick SM (2001) Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiol Aging* 22 (5): 787–796.
57. Skelton RW, Bukach CM, Laurance HE, Thomas KGF, Jacobs WJ (2000) Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *J Clin Exp Neuropsychol* 22 (2): 157–175.
58. Deltour JJ (1993) Mill-Hill vocabulary scale of JG Raven. French adaptation and European norms. Braine-le-Chateau, Belgium: Editions L'application des techniques modernes.
59. Sorita E, N'Kaoua B, Larrue F, Criquillon J, Simion A, et al. (2012) Do patients with traumatic brain injury learn a route in the same way in real and virtual environments? *Disabil Rehabil* 00: 1–9.
60. 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. *Hum Factors* 53: 647–661.
61. Vandenberg SG, Kuse AR (1978) Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization. *Percept Mot Skills* 47: 599–604.
62. Wechsler D (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. New York, NY: Psychological Corporation.
63. Reitan RM (1992) *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.
64. Raven J, Raven JC, Court JH (2003) *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 1: General Overview*. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.
65. Craik FIM (1983) On the transfer of information from temporary to permanent memory. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* (302): 341–359.
66. 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. *Appl Cognit Psychol* (20): 807–821.
67. Pugnetti L, Mendozzi L, Brooks BM, Attrec EA, Barbieri, et al. (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.), S424–S430.
68. Sandamas G, Foreman N (2003) Active and passive spatial learning from a desktop virtual environment in male and female participants: A comparison with guessing controls. *J Health Soc Environ Issues* 4 (2): 15–22.
69. Norman DA, Bobrow DG (1975) On data-limited and resource-limited processes. *Cognit Psychol* 7: 44–64.
70. Dijkstra K, Moerman EM (2012) Effects of modality on memory for original and misleading information. *Acta Psychol* 140: 58–63.
71. Kormi-Nouri R (1995) The nature of memory for action events: An episodic integration view. *Eur J Cognit Psychol* 7: 337–363.
72. Verhaeghen P, Steitz DW, Sliwinski MJ, Cerella J (2003) Aging and dual-task performance: a meta-analysis. *Psychol Aging* 18 (3): 443–60.
73. Ketcham CJ, Stelmach GE (2001) Age-related declines in motor control. In Birren JE, Schaie KW editors, *Handbook of the psychology of aging* (5th ed.). San Diego, CA: Academic Press, 349–379.
74. Tulving E, Thomson DM (1973) Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychol Rev* 80 (5): 352–373.
75. Etchamendy N, Konishi K, Pike GB, Marighetto A, Bohbot VD (2012) Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: A study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus* 22: 869–880.

**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.]**

### **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 issus de cette nouvelle voie d'investigation sont présentés en regard des difficultés d'apprentissage et de navigation dans les petits et grands espaces au cours du vieillissement « normal » et dans la Maladie Alzheimer (MA). 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 neurales de la cognition spatiale grâce au couplage entre RV et imagerie neuro-fonctionnelle.*

**Mots-clés** : Réalité virtuelle ; Cognition spatiale; Vieillissement cognitif ; Maladie d'Alzheimer.

### **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 in normal aging and the Alzheimer Disease (MA). This review highlights the recent advances allowed by Virtual Reality and the next researches perspectives, 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, Alzheimer Disease.

## **Introduction**

Primordiales à l'autonomie, les activités de déplacements et de navigation dans les grands espaces et leur restriction sont des enjeux importants dans le domaine du vieillissement neurocognitif, notamment pour leur rôle dans le dépistage d'un syndrome démentiel [1-4].

Grâce aux progrès des interfaces Homme-Machine plus adaptées aux utilisateurs âgés, l'introduction des applications de Réalité Virtuelle (RV) permet aujourd'hui des avancées considérables dans ce domaine [5, 6]. 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 plus écologique de la cognition spatiale du sujet âgé, tout en assurant des conditions d'étude à la fois contrôlées et sécurisées pour la personne [7-9].

Dans cette revue de littérature, les notions et bases théoriques relatives à l'étude de la cognition spatiale seront d'abord exposées, en mettant l'accent sur les éclairages offerts par les études reposant sur les outils de RV. Puis, les apports et les perspectives de recherche proposées dans les études utilisant la RV seront mis en lumière afin de comprendre les effets du vieillissement normal ou pathologique sur la cognition spatiale.

## **NOTIONS ET BASES THEORIQUES DE LA COGNITION SPATIALE**

Parmi les notions et bases théoriques couramment abordées dans les recherches portant sur la navigation et l'apprentissage spatial, la distinction entre *cognition spatiale à petite vs. grande échelle* ainsi que les *modèles de construction des connaissances spatiales* et les *stratégies de navigation* qui y sont associées, occupent une place importante [6, 9]. De même, le rôle des informations *sensori-motrices* et du *mécanisme d'intégration de trajet* est couramment investi pour décrire les relations entre cognition et action [5, 6].

***-Distinction cognition spatiale à petite vs. grande échelle -*** Les capacités visuospatiales ont été classées selon les études en différentes composantes, dont le nombre et la description varient selon les auteurs [10-12] et les approches (psychométriques, développementales ou neuropsychologiques). Cependant, la distinction entre cognition spatiale à petite échelle vs. grande échelle sert le plus souvent de référence [13]. Les fonctions visuospatiales à petite échelle sont définies comme les capacités à encoder, manipuler mentalement des objets de petite taille, et sont donc associées aux transformations d'informations spatiales, à la mémoire de travail spatiale et au fonctionnement du lobe pariétal [14]. De son côté, la cognition spatiale à grande échelle décrit les capacités d'apprentissage et de navigation dans les grands espaces, nécessitant des aptitudes autres que celles mobilisées pour la cognition spatiale à petite échelle. En particulier, elle mobiliserait la mémoire à long terme et 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 stratégies de navigation servant la planification de trajets dans un espace donné (« Wayfinding ») [10, 16-18]. Elle serait donc plus dépendante du fonctionnement du lobe temporal médian et des structures frontales [13, 14, 17, 18].

Des débats demeurent sur la nature des relations qu'entretiennent ces deux classes d'aptitudes visuospatiales [12]: modèles unitaires (pas de dissociation, les processus sont communs entre tests visuo-spatiaux à petite échelle et navigation dans de grands espaces) [18]; modèle de dissociation (totale ou partielle, [19]) ou encore modèle à médiation (où la relation entre ces aptitudes est expliquée par un autre facteur commun, comme l'encodage d'information visuelle et son maintien en mémoire de travail [12]. Quel que soit le modèle considéré, la distinction « petite vs. grande échelle » est justifiée par les auteurs par l'observation de faibles corrélations entre les tests visuo-spatiaux de type « papier-crayon » évaluant les capacités

visuospatiales à petite échelle et les performances d'apprentissage et de navigation dans des grands espaces en milieu naturels et le manque de validité écologique des tests « papier-crayon » [10, 12].

Ce contexte ainsi que la similitude des performances entre condition réelle et condition virtuelle rapportée chez des sujets jeunes [20] ont conduit à préconiser l'usage de la RV comme outil de recherche sur la cognition spatiale dans les grands espaces [7, 16].

**-Construction des représentations spatiales -** Le modèle de Siegel & White [21] (modèle « Landmark-Route-Survey » appelé aussi modèle L-R-S) a longtemps fait référence dans le domaine de l'acquisition des représentations spatiales. 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 [22, 23], et enfin, un dernier niveau permettant une représentation de type configurationnel (« Survey », en anglais) associé au concept de carte cognitive [22, 24]. Ce modèle imposait une sérialité et une hiérarchie des connaissances spatiales. Néanmoins, les récents modèles introduisent le parallélisme des niveaux, pour rendre compte par exemple que les informations métriques (nécessaires au développement du niveau « Survey/configurationnel »), puissent être acquises dès les premiers apprentissages [25, 26]. D'ailleurs, de nombreuses études en RV ont examiné le rôle des variables dites « médiatrices » de la cognition spatiale, comme les fonctions attentionnelles, la mémoire de travail et la prise de décision afin d'éclaircir la nature des mécanismes de construction des connaissances spatiales selon les trois niveaux (L-R-S) : contrôlée et sérielle ou au contraire, plus automatique et parallèle. En résumé, il apparaît que l'acquisition du premier niveau (« Repère ») implique majoritairement des opérations automatiques alors que les deux

derniers niveaux de connaissances spatiales (« route et survey ») impliqueraient des opérations plus contrôlées [27].

**-Stratégies de navigation égocentrique vs. allocentrique** - Concernant les stratégies de navigation, malgré des différences entre les modèles, tous proposent qu'elles soient définies comme des plans cognitifs nécessitant de sélectionner des routes, de planifier et d'exécuter un trajet d'une position à une autre, en utilisant les connaissances acquises de l'environnement (de type route ou/et « survey ») [14-16].

En regard des travaux reposant sur les techniques de RV, les études utilisant des labyrinthes [28-30] se sont intéressées à la distinction entre deux grandes stratégies de navigation, la première appelée « égocentrique » et la seconde appelée « allocentrique ». De ces études, il est établi que la stratégie « égocentrique » reposerait sur l'utilisation de représentations de type « stimulus-réponse » dépendante principalement du fonctionnement du noyau caudé [31], et même, certains auteurs la de stratégie procédurale pour en souligner le caractère sensori-moteur et ou cognitif hautement « routinisable » [29, 30]). Cette stratégie est aussi parfois associée à la mémorisation et l'utilisation de connaissances de type route [17, 29, 30]. La stratégie de navigation allocentrique reposerait quant à elle sur l'utilisation d'une représentation de type carte cognitive, dépendante principalement du fonctionnement de l'hippocampe [24, 34]. Cette distinction est répliquée dans des applications virtuelles plus réalistes (e.g., [32] impliquant une planification de trajet pour atteindre un but non visible, appelé en anglais « *Wayfinding* » [14, 15, 33].

Aussi, dernièrement, les études associant la RV aux systèmes de neuro-imagerie fonctionnelle révèlent 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 [17, 34, 35]. L'étude de Latini-Corazzini et al. [36] montre que ce large réseau mobiliserait 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, la planification et le contrôle nécessaires à la navigation, ainsi que dans le maintien du but en mémoire de travail [32, 37, 39].

**-*Mécanisme d'intégration de trajet*** – Un autre domaine important de la cognition spatiale est l'étude du rôle des informations sensorimotrices et du mécanisme d'intégration du trajet (« *Path integration* », en anglais ; [27, 38, 39]). Ce mécanisme est actuellement défini comme intervenant dans les opérations de mise à jour de sa position et de son orientation par rapport à son point de départ lors de déplacements, en utilisant les informations basées sur les mouvements du corps. Trois sources principales d'informations sensorielles seraient concernées [27, 39] : le flux optique (i.e., entrées visuelles dynamiques liées aux mouvements des formes, des textures, des points de repères ou d'objets, etc.) [40] ; les stimulations vestibulaires, et celles d'origine kinesthésique (i.e., retour proprioceptif des muscles et des tendons et copies efférentes des commandes motrices venant des aires cérébrales motrices) [41]. Différentes études utilisant la RV confirment que ce mécanisme participe à l'acquisition des niveaux de connaissances spatiales route et survey, le rôle respectif des différents canaux sensoriels restant par contre, débattu [27]. Dans ce débat, les études basées sur la RV sont prometteuses, grâce à la diversité des interfaces pouvant combiner différents espaces d'affichage (taille, formes des écrans, vidéocasque, etc) et différents interacteurs (joystick, tapis roulant, ...) qui permettent l'étude des effets isolés ou combinés des différentes sources de stimulations sensorielles induites par les mouvements du corps.

Au total, l'apprentissage et la navigation dans les grands espaces couvrent des activités complexes, dépendantes d'un ensemble d'aptitudes et de mécanismes, pouvant impliquer les fonctions visuospatiales à petite échelle, la mémoire spatiale à grande échelle, la planification des parcours mais aussi l'intégration sensorimotrice relatives aux mouvements [9, 12, 16, 27].

De par la complexité cognitive et motrice de cette activité ainsi que le caractère plus ou moins contrôlé des opérations qui s'y rapportent, il n'est pas étonnant que des études aient examiné l'impact des effets du vieillissement normal ou de celui d'une pathologie neurodégénérative telle que la démence de type Alzheimer.

### **COGNITION SPATIALE ET VIEILLISSEMENT NORMAL**

Concernant les aptitudes à petite échelle, un déclin lié à l'âge est observé avec les évaluations classiques, quelle que soit l'aptitude visuospatiale considérée: rotation mentale [42, 43], prise de perspective mentale [44], et d'autres tests évaluant d'autres composants visuo-spatiaux [10, 45, 46]. Les études en RV sont très peu nombreuses chez la personne âgée et, malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas été confrontés à ceux issus des tests conventionnels « papier-crayon », ne permettant pas d'apprécier leur valeur ajoutée. A titre d'exemple, McGee et al [50] ont développé un ensemble de tests, dont un test de manipulation et de rotation manuelle de figures 3D dans un EV (utilisant les mêmes figures que le test de rotation mentale de Shepard & Metzler [51] et nécessitant de tourner et superposer des figures virtuelles) et ils ont montré qu'un entraînement (100 essais avec des figures de plus en plus complexes) en RV améliore les performances à la tâche de rotation manuelle chez les personnes âgées, ouvrant ainsi la possibilité d'utiliser la RV pour l'entraînement des fonctions visuospatiales à petite échelle chez les personnes âgées.

A ces quelques études, s'ajoutent des travaux explorant des mécanismes sensibles au vieillissement, mais dont l'étude était jusque là contrainte par les techniques à disposition. Par exemple, l'étude de Messier et al. [52] avait pour but d'évaluer les capacités d'apprentissage d'une nouvelle coordination visuo-motrice. La tâche utilisée nécessitait d'atteindre la position d'une balle dans un espace virtuel, alors qu'une distorsion entre la position réelle de la main et

celle obtenue dans l'Environnement Virtuel (EV) était introduite. Cette étude révéla 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.

En ce qui concerne la cognition spatiale à grande échelle, un effet du vieillissement sur les capacités de navigation dans des grands espaces est bien connu [3, 53], et s'accompagnerait même de plaintes subjectives chez le sujet âgé [54]. Les études en RV révèlent que ce déclin navigationnel aurait une origine multifactorielle (pour revue, [3, 16], avec notamment des difficultés d'acquisition des représentations spatiales liées au déclin du fonctionnement de l'hippocampe [55], un défaut de planification des trajets (associé au fonctionnement exécutif, [16, 56], et enfin, un déficit touchant l'intégration des informations sensorimotrices [57].

- **Construction des représentations spatiales** - Concernant le développement des connaissances spatiales dans des grands espaces, et en référence au modèle L-R-S, un déclin touchant les trois niveaux de connaissances a été précédemment rapporté dans les tests en conditions réelle ou utilisant des séries de photos [2, 58-64]. Ce déclin a été reproduit dans des environnements virtuels réalistes [65-79]. La similitude des résultats en RV et en réel indique que la RV est bon outil d'estimation des difficultés réelles de mémoire spatiale dans les grands espaces chez les personnes âgées. Toutefois, ces résultats restent à confirmer, les études comparant directement les apprentissages dans des EV à des équivalents réels restant peu nombreuses chez la personne âgée. En effet, seule l'étude de Cushman et al. [65] propose une comparaison directe et démontre des effets du vieillissement équivalents entre les deux situations d'apprentissage (réel et virtuel), quel que soit le niveau de représentation testé, ce qui supporte l'intérêt de la RV.

-**Stratégies de navigation égocentrique vs. allocentrique**- Deux approches se distinguent dans ce domaine : une première utilisant des répliques virtuelles de labyrinthes (issues des travaux

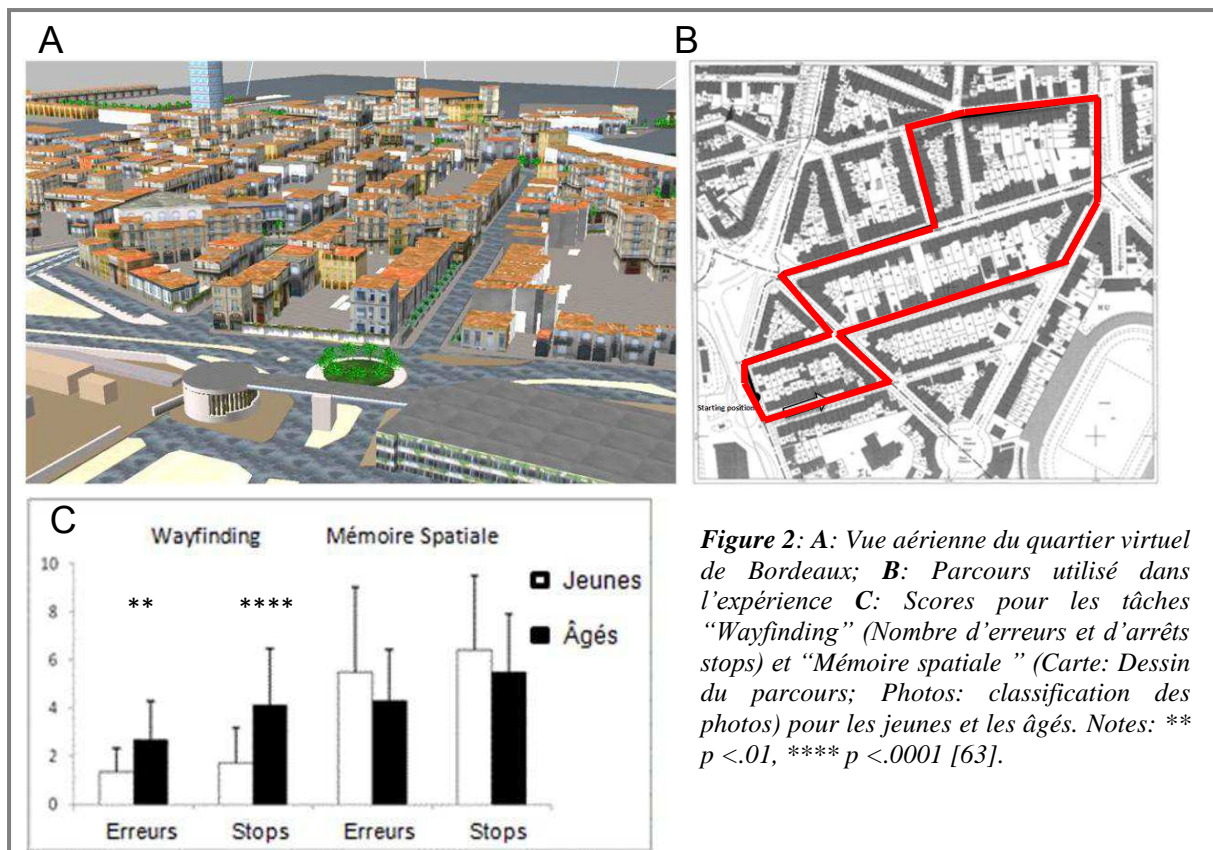
chez l'animal) plutôt en faveur d'une atteinte sélective liée à l'âge de la stratégie allocentrique en lien avec l'hypothèse du déficit mnésique (à relier aux lésions de la sénescence touchant les structures médo-temporales) [80]; et une seconde utilisant des applications réalistes plutôt en accord avec une atteinte globale des stratégies de navigation en lien avec l'hypothèse du déclin fronto-exécutif lié à l'âge [56, 81].

Des versions virtuelles de la piscine de Morris<sup>1</sup> [82-89], adaptée à l'humain, ont permis de reproduire le déclin observé dans sa version réelle [53], suggérant des difficultés particulières chez les personnes âgées pour développer et utiliser des représentations spatiales allocentriques pour servir leur stratégie de navigation. Plus récemment, et toujours à l'aide de répliques virtuelles de labyrinthes, deux études ont conclu au caractère sélectif des effets de l'âge sur les stratégies de navigation allocentriques. La première étude utilisait un labyrinthe radiaire à 12 bras [91] et la seconde un labyrinthe en Y [92], et, ont obtenu des résultats indiquant une utilisation préférentielle chez les personnes âgées de la stratégie « égocentrique » (ou « procédurale »), associée à un déficit des apprentissages associatifs (ou mettant en jeu l'utilisation d'une « carte cognitive »). Ainsi, l'atteinte sélective de la stratégie allocentrique avec l'âge serait à associer au déclin de mémoire spatiale, et en particulier aux mécanismes d'acquisition des représentations de type « carte cognitive ». Notons, toutefois, que la préférence des âgés pour les stratégies de navigation de type « procédurale » peut paraître contradictoire avec les difficultés de mémoire de route observées dans des labyrinthes virtuels de plus grande taille [71, 77, 93, 94], et reste donc à être confirmée, et notamment en situations plus réalistes (environnements virtuels et réels).

---

<sup>1</sup>La piscine de Morris est un labyrinthe classiquement utilisé chez le rat pour l'étude de 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 » [90].

Dans les travaux portant sur des environnements virtuels réalistes et de plus grande taille, cette contradiction a été en partie levée, en ayant recours à l'hypothèse du déclin exécutif lié à l'âge, qui pourrait affecter la planification ou le choix de la stratégie de navigation appropriée. En effet, il est reconnu que la navigation 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 [9, 15, 16]. Certains auteurs ont donc suggéré un rôle du déclin exécutif [56, 81] dans les difficultés de navigation chez les personnes âgées, en plus des déclinés mnésiques, visuo-spatiaux ou d'intégration des informations relatives aux mouvements [3, 16, 59]. Peu d'études se sont engagées directement dans cette voie. Néanmoins, deux études basées sur la RV l'ont suggéré en montrant qu'avec des connaissances spatiales équivalentes, les personnes âgées présentent des performances de navigation inférieures aux jeunes [67, 72, 73]. Ces résultats suggèrent des difficultés dans l'utilisation des connaissances acquises et/ou leur utilisation pour planifier les trajets (associé au déclin exécutif). Et, notre étude récente [63] a clairement montré que le rôle du déclin dyséxécutif dans les difficultés navigationnelles chez les âgés. En effet, à l'aide d'un réplica virtuel du quartier Saint-Augustin (attenant au CHU de la ville de Bordeaux) que nous nous avons construit (figure 2, Partie A), des participants jeunes et âgés ont été exposé à un parcours avec consigne de mémoriser le trajet effectué (Figure 2, Partie B) De là, nous nous avons comparé les performances de mémoire spatiale (connaissances de type « route » et « survey /configurationnelles») et de navigation (« wayfinding ») entre un groupe de jeunes et d'âgé » et avons retrouvé une absence d'effet du vieillissement sur les connaissances spatiales acquises en RV contrastant avec un déclin des performances sur la tâche de navigation (« Wayfinding) en termes d'erreurs de directions et d'arrêts ou stops effectués par les participants (Figure 2, Partie C). De plus, ce déclin était corrélé aux déclinés exécutifs mesurés à l'aide d'une batterie de tests neuropsychologiques.



Erreurs dans figures Pour Carte /erreurs et Stops/Photos

Face à ce débat entre déclin mnésique et/ou exécutif comme origine des difficultés de navigation avec l'âge, très vite sont apparus des travaux associant la RV à des techniques de neuro-imagerie afin d'étayer l'une ou l'autre hypothèse par l'étude des substrats anatomiques impliqués. Néanmoins, à ce jour, les travaux à disposition sont encore peu nombreux pour parvenir à une conclusion tranchée. Une des raisons à cela, est que les quelques études disponibles mettent en relation des épreuves de mémoire spatiale ou de navigation dans différents types d'EV en utilisant soit des techniques d'imagerie fonctionnelle et/ou des mesures volumétriques cérébrales; Antonova et al. [82] ont étudié à la fois la corrélation entre l'activation cérébrale (IRMf) et des mesures du volume de régions cérébrales aux performances de navigation dans une version virtuelle de la Piscine de Morris ; Moffat et al. [79] ont utilisé un environnement virtuel composé de plusieurs pièces, interconnectées par des

couloirs et ont mesuré l'activation du cerveau pendant l'encodage de la configuration de l'environnement ; Meulenbroek et al. [66] ont analysé l'activation de structures cérébrales pendant l'encodage et la restitution de connaissances d'une route dans un environnement virtuel ; et Etchamendy, et al. [91] ont étudié la corrélation entre les performances au test de leur labyrinthe radiaire et l'activation observée par IRMf du cortex préfrontal dorso-latéral, du noyau caudé et de l'hippocampe.

L'ensemble des résultats suggère des modifications fonctionnelles associées à l'âge (comparaison jeune vs. âgé) touchant un large réseau de structures temporales et frontales. En effet, des résultats rapportent un déclin touchant l'utilisation des représentations de type carte cognitive associé à une hypoactivation de l'hippocampe et du gyrus parahippocampique (contrastant avec la préservation de la mémoire de route/procédurale associée au noyau caudé) [91, 92, 95]. On peut noter également l'étude de Meulenbroek et al. [66] montrant cette fois-ci un déclin touchant la mémoire de route, associé à une réduction de l'activité du gyrus parahippocampique, ce qui notons le, va à l'encontre d'une dissociation neuro-fonctionnelle complète entre la stratégie de navigation procédurale (route) reliées au fonctionnement du noyau caudé et la stratégie « allocentrique » associé au fonctionnement du lobe temporal médian. De plus, le rôle du déclin fronto-exécutif est également confirmé par les modifications d'activités du cortex préfrontal associé aux difficultés de navigation chez les personnes âgées [79, 82, 97].

Ces résultats sont confortés par les études utilisant des mesures volumétriques cérébrales. Quelques études ont montré que le déclin des connaissances de type « route » et « survey » était associé à la perte du volume d'un réseau de structures assez large (hippocampe, gyrus parahippocampique, noyau caudé) [71, 82, 86]. 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 [29, 32]. Quant à

Moffat et al. [86], ils 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 Test [98], soulignant ainsi le rôle prépondérant du déclin exécutif dans les performances de navigation, même dans des environnements relativement simples. La corrélation entre les performances et la perte de volume dans le cortex préfrontal n'a, par contre, pas été observée dans l'étude de Head et al. [71].

Au total, les résultats actuellement disponibles ne permettent pas de décider entre une atteinte sélective ou globale des stratégies de navigation. C'est pourquoi certains auteurs préfèrent aujourd'hui faire appel à l'hypothèse multifactorielle, dans laquelle le facteur « temporal-mnésique » et le facteur « frontal-exécutif » occupent une place explicative équivalente dans le déclin des capacités de navigation liées au vieillissement [4, 96].

***-Activités sensorimotrices et intégration de trajet*** – L'intégration de trajet ou le rôle des informations sensorimotrices dans la cognition spatiale chez la personne âgée a fait l'objet de peu d'études pour le moment. Cependant, trois études se sont intéressées au rôle spécifique du flux optique [88, 99-100] et une aux différentes composantes sensorielles participant à l'intégration du trajet [101]. La première étude adressant le rôle du flux optique a conclu à des difficultés liées à l'âge [88]. Les deux autres études ont complété ce résultat en s'intéressant aux composantes rotationnelles (composante du flux optique liée aux mouvements de rotation) et translationnelles (composante liée aux mouvements translationnels) du flux optique.[99, 100]. Harris et al. [99] concluent à un rôle à la fois des composantes translationnelles et rotationnelles alors que Mahmood et al. [100], de leur côté, concluent à un rôle prépondérant de la composante rotationnelle dans le déclin lié à l'âge sur les mécanismes d'intégration trajet. Enfin, l'étude d'Adamo et al. [101] s'intéressant au flux optique mais aussi aux autres



sources de stimulation sensorielle, rapporte des résultats indiquant que les différences liées à l'âge sur les composantes rotationnelles et translationnelles dépendent du canal sensoriel stimulé lors de la navigation. Dans cette étude les effets de l'âge sur une tâche de complétion de triangle ont été investigués dans différentes conditions sensorielles: « marche en aveugle » en condition réelle (condition de stimulations proprioceptives et vestibulaires), « chaise roulante » en aveugle et en condition réelle, (condition de stimulations vestibulaires seules) et une condition « virtuelle » (condition de stimulations optiques seules). Et., sur les conditions monosensorielles, l'augmentation avec l'âge des erreurs rotationnelles s'observait aussi bien en condition « vestibulaire » ou « flux optique » alors que l'augmentation des erreurs translationnelles s'observait uniquement en condition « flux optique ». Par contre, ces erreurs étaient diminuées chez les sujets âgés en condition de stimulation multisensorielle (condition « vestibulaire et proprioceptive »). En résumé, chez les âgés, les performances sont meilleures lorsque deux types d'informations sont disponibles (proprioceptives et vestibulaires) et sont les plus altérées lorsque le flux optique seul est disponible.

Cette conclusion rejoint celle d'Allen et al. [57] révélant le possible rôle compensatoire d'une stimulation multisensorielle chez les personnes âgées sur le mécanisme d'intégration de trajet. En effet, ces auteurs avaient rapporté un déclin lié à l'âge dans l'intégration de trajet lorsqu'un seul type d'information était disponible (eg., vestibulaire) mais des performances préservées lorsque plusieurs sources étaient fournies (eg., vestibulaires et proprioceptives).

Ces premiers résultats sur l'effet du vieillissement sur les mécanismes d'intégration de trajet suggèrent que le déficit sensoriel associé à l'âge [102] peut être compensé lorsque différentes sources sensorielles sont fournies. Ainsi, les études portant sur les différentes combinaisons de stimulation sensorielle (flux optique, informations sensorimotrices, proprioceptives et/ou copies efférentes motrices), comme celle menée par Adamo et al. [101] seront riches

d'apports pour la compréhension des effets de l'âge (déclin et compensation) sur le processus d'intégration du trajet.

Il serait difficile de clore ces aspects sensorimoteurs impactant la cognition spatiale sans évoquer les premiers résultats concernant les effets du vieillissement sur les relations entre cognition spatiale et contrôle moteur. L'étude de Lövdén, Schellenbach, Grossman-Hutter et al. [103] a 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 diminuait les performances de mémoire spatiale et provoquait une augmentation des mouvements du tronc des personnes âgées. De la même manière, notre équipe rapporte chez des adultes âgés un effet délétère du contrôle moteur (condition passive vs. active avec le joystick) sur leurs performances de navigation et de mémoire spatiale (de type « carte cognitive » uniquement), effet qui s'est révélé « médié » par le déclin exécutif (et non mnésique) mesuré à l'aide de tests neuropsychologiques [104]. En outre, de manière intéressante, les jeunes participants présentaient des performances détériorées en condition actives sur les mesures de mémoire spatiale de type « carte cognitive », ils présentaient néanmoins des performances de navigation améliorées après un apprentissage en condition active. Pris ensemble, ces résultats indiquent que le contrôle moteur en condition active détériore l'élaboration de connaissances spatiales de haut niveau tel un effet « double tâche » mettant tous les participants en limitation de ressources cognitives mais que seuls les participants jeunes tiraient partie d'une navigation uniquement guidée par des connaissances spatiales de type route, révélant ainsi une plus grande flexibilité chez les jeunes dans l'ajustement de leur stratégie de navigation.

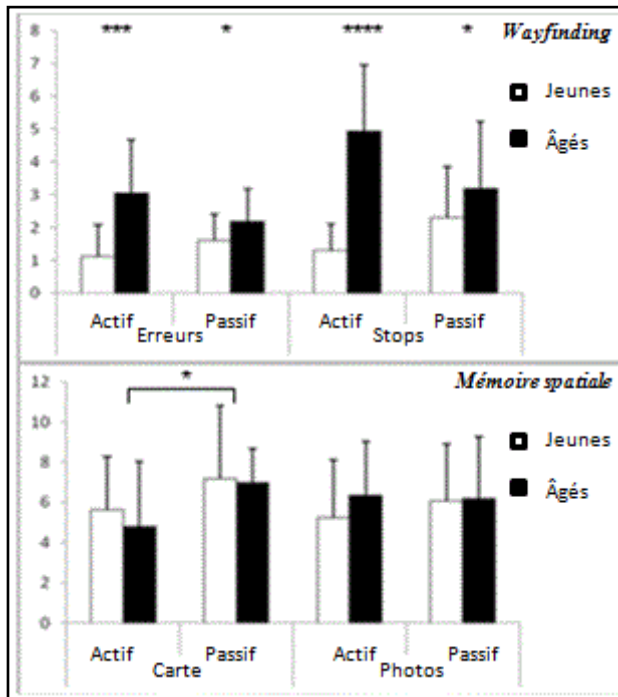


Figure 3 : Effets de l'âge et du mode d'apprentissage sur les performances aux tâches « wayfinding » et « mémoire spatiale » [104].

En haut: Performance à la tâche Wayfinding (tâche de navigation)- les âgés commettent plus d'erreurs et d'arrêts en condition active qu'en condition passive.

En bas: Performance aux épreuves de Mémoire spatiale (tâche de croquis/carte du parcours et tâche de classification chronologique de scènes/photos du parcours) – Un effet délétère de la condition active est observée sur la tâche de dessin (Map), quel que soit l'âge des participants.

Note. \*  $p < .05$ ; \*\*\* $p < .001$ ; \*\*\*\* $p < .0001$

Ainsi, le contrôle de l'équilibre, et au sens large le contrôle sensori-moteur durant la marche, pourraient mobiliser chez la personne âgée des ressources en mémoire de travail ou un contrôle exécutif affectant en retour les performances des activités cognitives concourantes, dont le fonctionnement de la mémoire spatiale et la planification de trajet. Cette interprétation rejoint celle avancée notamment dans les études s'intéressant au coût cognitif induit par le déficit sensoriel associé à l'âge [105-107].

### ***Conclusion et Perspectives.***

Ces premières études montrent que la RV peut être un outil écologique pertinent d'évaluation et d'analyse de l'origine des difficultés de navigation chez les personnes âgées. Elles mettent en lumière leur origine multifactorielle incluant des déclins neurocognitifs de la mémoire spatiale (rôle des structures medio-temporales dans l'acquisition des connaissances landmark, route et survey), du fonctionnement exécutif (rôles des structures frontales et préfrontales dans la planification et le contrôle moteur) mais aussi de l'intégration des informations

sensorimotrices (rôle de l'altération de différentes structures (cortex pariétal, gyrus cingulaire postérieur notamment) dans les difficultés d'intégration de trajet) [3, 4, 16, 97].

D'autres études doivent étayer cette conclusion et apporter plus de précisions. Par exemple, les études utilisant le couplage RV-imagerie fonctionnelle sont encore peu nombreuses et n'ont pas comparé les activations à la fois durant l'encodage, la récupération, la planification ou l'exécution du trajet, comme soulignés par certains auteurs [97]. Ces comparaisons permettraient d'éclairer le rôle des structures impliquées dans les effets du vieillissement normal sur la mémoire spatiale et la navigation. Aussi, le rôle des différentes composantes sensorimotrices (copies efférentes motrices, informations proprioceptives, vestibulaires et flux optique) sur le développement des connaissances spatiales (de type landmark, route et survey) doit être précisé chez les âgés.

De même, l'interaction entre contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif est pour le moment peu abordé et les futurs travaux pourraient s'inspirer des travaux sur la marche montrant que celle-ci place les personnes âgées en situation de tâches multiples [108] dans laquelle le contrôle sensori-moteur devient prioritaire sur la navigation (voir [107] ; 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 contrôle sensorimoteur, mémoire spatiale et navigation [27].

D'autres attentes peuvent être formulées, notamment concernant la validité écologique des applications utilisant la RV. En effet, les études analysant la relation entre les performances en RV, et celles obtenues par des questionnaires d'auto-estimation des difficultés sont peu nombreuses pour le moment. Des études dans ce domaine enrichiraient la compréhension des liens entre déclin des capacités de navigation et difficultés métacognitives des âgés [63, 109]. De plus, l'effet du sexe, largement rapporté dans la littérature chez les jeunes [110, 111] est peu pris en compte dans les études portant sur les effets du vieillissement sur la cognition

spatiale [73, 84]. Concernant la cognition spatiale à petite échelle, les femmes présentent le plus souvent des performances inférieures aux hommes [11, 18]. Dans le domaine de la cognition spatiale à grande échelle, les femmes privilégieraient plutôt les représentations de type route et les hommes les représentations de type survey [12]. Et, la surprésentation des femmes parmi les participants aux études portant sur l'effet du vieillissement pourrait être une source de surestimation des effets du vieillissement sur les mécanismes de cognition spatiale sensible aux effets de genre. 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.

**VEILLISSEMENT PATHOLOGIQUE** Parmi les neuropathologies du vieillissement, la maladie d'Alzheimer (MA) est la plus étudiée pour ses conséquences sur la cognition spatiale à grande échelle <sup>2</sup> [45, 112].

Les troubles *de la cognition spatiale à grande échelle* dans la MA ont fait l'objet de plusieurs travaux en RV. La raison en est que la désorientation topographique (troubles de la navigation et de l'apprentissage dans les grands espaces), peut apparaître précocement dans la DTA [1, 2, 33]. Celle-ci serait un facteur majeur de la perte d'autonomie et de risque d'accidents chez ces personnes [116], et est souvent à l'origine du placement en institution [116]. Une autre caractéristique importante de la MA est la détérioration de la mémoire épisodique [118, 119], et en particulier de sa composante spatiale. Cette détérioration est largement rapportée par les

---

<sup>2</sup>Cependant un déclin affectant les *capacités visuo-spatiales à petite échelle* a été également noté chez les patients MA: déficit de l'exploration spatiale (difficultés pour localiser et atteindre des objets, hémignégligence, etc.) [112], praxies visuo-constructives (copie, dessin et construction de figures en 3D) [113], problème de détection de rotation de figures [114], ou de rotation mentale évaluée à l'aide du MRMT [115, 116] ; pour revue, voir également [45]. A notre connaissance, aucune étude n'a pour l'instant utilisé la RV pour l'évaluation de ces aptitudes ou l'étude de l'interaction entre fonctions visuo-motrices et visuospatiales dans la DTA.

études utilisant des évaluations en laboratoire de la mémoire spatiale (tâche analogue à la piscine de Morris : [120]; mémoire d'objets à l'aide de photos d'un appartement [121]) ou en condition réelle comme la mémoire de route [2, 122]. Cette altération de la mémoire spatiale semble principalement liée à une perte neuronale dans le lobe temporal médian [123, 124].

Néanmoins, ce déclin mnésique pourrait ne pas être la seule cause de cette désorientation topographique. En effet, des troubles affectant l'intégration du trajet basée sur le flux optique [125-127], les déficits attentionnels [128], mais aussi les perturbations exécutives comme les capacités de planification [33, 116, 129] ont été rapportés. Cette concomitance de facteurs sensibles à la MA conférerait aux tâches de cognition spatiale à grande échelle un grand intérêt quant à leur potentiel pour son dépistage précoce. Pour autant, les travaux actuels utilisant la RV explorent surtout l'atteinte sélective des mécanismes d'acquisition des représentations spatiales comme origine de la désorientation topographique dans la MA et visent même pour certains à en démontrer le potentiel clinique de la RV pour le diagnostic précoce et le dépistage de la MA.

Jheng et al. [130] ont étudié la préservation ou l'altération des mémoires topographiques rétrograde et antérograde dans la MA, à l'aide de différentes tâches utilisant des arènes virtuelles analogues à la piscine de Morris (trouver une plateforme invisible dans une arène comportant des repères visuels sur les parois). Dans une première expérience, la configuration de l'arène était totalement nouvelle, dans une seconde, 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. Leurs résultats ont permis de confirmer le déclin de la mémoire spatiale antérograde et la préservation de la mémoire spatiale rétrograde dans la MA déjà évoqués dans la littérature [131, 132]. Dans une étude de cas, Burgess, Trinkler, King et al. [133] ont testé la mémoire topographique d'un patient atteint de

MA à l'aide d'un environnement urbain virtuel. Différentes mesures concernant le fonctionnement neuro-cognitif de ce patient ont été réalisées (épreuves visuo-spatiales, visuo-perceptives, de calcul, de mémoire des visages, de mémoire verbale, du fonctionnement exécutif). Les tâches à l'étude étaient des tâches de mémoire de type « wayfinding », de reconnaissance de repères ou de scènes visuelles. Sur les mesures psychométriques, 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 reconnaissance des scènes en 3D, dès lors qu'un changement de point de vue était introduit entre l'apprentissage et le rappel. Ces résultats ont été interprétés par les auteurs comme un déficit sélectif de la composante allocentrique de la mémoire spatiale (ou des mécanismes de transformations entre cadres de référence égocentriques et allocentriques), contrastant avec la préservation de la composante égocentrique (reconnaissance sans changement de point de vue). Ce déficit sélectif est associé pour les auteurs à une atteinte du lobe temporal médian et serait à l'origine des difficultés de navigation dans la MA [34, 35, 134].

Néanmoins, cette hypothèse d'une altération sélective des représentations allocentriques dans la MA est fragilisée par les études révélant également un déficit de l'acquisition des représentations de type route que ce soit en condition réelle [2, 21] ou en condition virtuelle [65, 134]. Par exemple, Zakzanis et al. [76] ont étudié les performances de sujets jeunes et âgés et de deux patients souffrant d'une MA probable, dans une tâche de mémoire comportant deux routes interférentes l'une avec l'autre (procédure similaire au California Verbal Learning Test [135], classiquement utilisé pour l'étude de la mémoire épisodique). 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, confirmant un déficit touchant la mémoire de route chez les personnes

souffrant de MA. De façon similaire, Widmann et al. [136] ont évalué la mémoire de type route : (3 changements de directions) dans un quartier virtuel (7 blocks) comportant des bijouteries, avec l'instruction explicite de retenir le nom des bijouteries. Les mémoires verbale et spatiale ont été testées à l'aide de différentes tâches : rappel libre et dénomination des magasins (mémoire verbale), dessin du parcours sur une feuille représentant les différents blocs du quartier (mémoire spatiale de type « route »), reconnaissance des magasins (mémoire verbale et spatiale de type « landmark/points de repère »), positionnement de photos de magasins sur un plan vide (mémoire spatiale de type « survey/configurationnel»). Les résultats obtenus suggèrent que les personnes souffrant de MA ont des difficultés touchant l'acquisition des connaissances de type « route » et « survey » mais pas celles du niveau « Landmark/point de repère ». Ainsi, pour les auteurs, la mémoire de route comme la mémoire allocentrique sont affectées précocement dans la MA contrairement à la mémoire des points de repères<sup>3</sup>. Le dernier point de cette conclusion est toutefois à modérer dans la mesure où contrairement aux niveaux « route » et « survey/configurationnel » où des tâches de rappel et de reconnaissance sont utilisées, pour le niveau « landmark », seule une tâche de reconnaissance est proposée ; or il est montré que les tâches de reconnaissance comparées aux tâches de rappel sont d'une moins grande sensibilité à la MA [65].

Au total, ces premières données issues des études en RV confirment l'altération des mécanismes d'acquisition et d'utilisation de représentations spatiales et supportent la préservation de la mémoire topographique rétrograde (souvenirs anciens d'environnements). Un point reste à éclaircir [123]: la spécificité de l'atteinte de la mémoire spatiale allocentrique ou au contraire une atteinte globale incluant tous les niveaux de représentations de type « landmark », « route » et « survey ».

---

3



Pour concilier ces résultats contradictoires, des auteurs proposent une atteinte graduelle de la mémoire spatiale où les lésions du lobe temporal médian en début de maladie affecteraient l'acquisition de représentations spatiales allocentriques [34, 137] pour ensuite, avec l'avancée dans la maladie, atteindre l'acquisition de représentations de type route [138, 139]. Cette hypothèse d'une atteinte progressive de la mémoire spatiale trouve quelques confirmations dans les études visant le dépistage et le diagnostic précoce de la MA.

En effet, partant de l'idée que l'altération sélective de la mémoire spatiale allocentrique pouvait être un marqueur comportemental d'une évolution vers une DTA [3, 124], des travaux ont comparé des personnes avec TCL (Trouble Cognitif Léger ou *Mild Cognitive Impairment* en anglais) et des patients avec MA. Actuellement, le TCL est considéré par certains auteurs comme un état intermédiaire entre le vieillissement normal et le vieillissement pathologique[140]. Différentes formes ont été décrites, amnésique et non amnésique, simple et multi-domaines, etc. et chacune de ces formes représenterait un stade prodromal de différentes formes de démence. La forme «amnésique-hippocampique » correspondrait à un stade précoce de MA [140, 141]. Des études ont donc examiné les performances de mémoire spatiale chez différentes formes de TCL ainsi que chez des personnes atteintes d'une MA [120, 142]. Et, il a alors été rapporté que l'altération de la mémoire spatiale allocentrique était commune et spécifique aux personnes souffrant de MA et d'un TCL de la forme « amnésique-hippocampique », confirmant l'intérêt clinique de la détection de cette altération pour le diagnostic précoce et différentiel de la MA. Cette conclusion est également retrouvée dans les quatre études menées avec des dispositifs RV. D'abord, Cushman et al. [65] 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 MA. Différentes tâches ont été administrées aux participants, pour évaluer les différents niveaux de représentations spatiales selon le modèle L-R-S de Siegel et White. Les résultats

de cette étude révèlent que les différences intergroupes sont identiques en condition réelle et en condition virtuelle (confirmant la validité des résultats obtenus avec la RV). Les personnes souffrant de MA et de TCL étaient déficitaires comparées aux sujets âgés pour l'acquisition de trois niveaux de connaissances spatiales. Cependant, la tâche identifiée comme la plus discriminante entre sujets âgés et les personnes souffrant de TCL ou de MA était la tâche de positionnement de photos sur une carte, confirmant l'atteinte caractéristique à ces deux stades cliniques de l'acquisition des représentations de type « survey ». Les performances à cette seule tâche permettaient un classement correct de 85% entre les âgés contrôles et les âgés porteurs de TCL ou de MA, témoignant du caractère discriminant de cette tâche pour le dépistage de la MA. Corollairement, deux autres études utilisant la RV ont montré que des tâches de mémoire de route ne permettaient pas de discriminer des sujets âgés contrôles vs. porteurs de TCL [143, 144]. Ceci est d'ailleurs cohérent avec l'étude de DeIpoyi et al. [145] qui, en condition réelle, montrait que les TCL ont des performances supérieures à celles des patients MA sur des tâches testant les connaissances de type route, et que leurs performances étaient reliés aux mesures volumétriques hippocampiques et pariétales.

Enfin, deux études ont testé directement l'utilisation des tests de mémoire spatiale dans des applications virtuelles pour le diagnostic précoce de la MA. Dans la première, Weniger et al. [146] se sont intéressés au caractère prédictif de deux tests de mémoire spatiale et de navigation dans la conversion des TCL-amnésiques en MA. Ils ont utilisé ces deux tâches de mémoire spatiale, et sur un suivi longitudinal de 6 ans, ils ont étudié les relations entre les performances de mémoire spatiale et les mesures volumétriques cérébrales (hippocampe, cortex pariétal, précuneus, et ganglions de la base). Deux tests de mémoire spatiale dans deux EV différents ont été utilisés : le premier, le « Virtual Park », propose une tâche supposée sonder une stratégie de navigation « allocentrique » et, le second, le « Virtual Maze », une stratégie de navigation « égocentrique » (ou procédurale). Les personnes souffrant de TCL de

la forme amnésique présentait d'une part, des performances déficitaires aux deux tests virtuels et d'autre part, des réductions volumétriques touchant l'hippocampe (bilatéral), le précuneus (droit) et pariétal (droit). Par contre, seule la réduction volumétrique hippocampique prédisait la conversion TCL vers la MA. Le caractère non prédictif de leurs tests de mémoire spatiale peut être expliqué par un défaut de spécificité des tâches utilisées [147]. En effet, leur tâche dite égocentrique a activé le gyrus parahippocampique (plutôt associé au traitement des informations de type « survey » [148]. Ce manque de spécificité des tâches utilisées aux composantes égocentrique et allocentrique pourrait expliquer son incapacité à prédire la conversion d'un TCL vers la MA. Les auteurs concluent que les investigations sur la conversion d'un TCL vers la MA sur la base de tests de mémoire spatiale doivent veiller à une meilleure spécificité des tâches aux représentations spatiales allocentriques.

Bellassen et al. [149] ont de leur côté, montré la capacité d'un test de mémoire de chronologie temporelle dans un labyrinthe virtuel (« Starmaze », formé d'un pentagone et de bras) pour différencier des patients souffrant de MA de patients souffrant de dégénérescence fronto-temporale et de personnes âgées ne souffrant d'aucune pathologie. Ils ont également pu montrer que ce test permettait de prédire la conversion de patients souffrant de TCL en MA sur 12 à 18 mois. On peut remarquer que contrairement aux hypothèses les plus répandues, c'est un test évaluant la mémoire procédurale qui semble prédire l'évolution vers la MA. Ces résultats sont donc contradictoires avec l'hypothèse répandue associant le fonctionnement de l'hippocampe spécifiquement à l'acquisition des connaissances de type allocentrique et suggérant l'utilisation de tests mettant en jeu cette mémoire comme outil de diagnostic précoce de la MA [3, 124, 142].

Ainsi, l'hypothèse d'une atteinte sélective de la mémoire spatiale allocentrique en début de maladie s'étendant aux autres composantes de la mémoire spatiale avec l'avancée de la

maladie semble être soutenue par ces premiers travaux en RV. Dans une même logique d'atteinte graduelle avec la progression de la maladie, les études à venir en RV pourraient questionner le rôle des mécanismes d'intégration des informations sensorimotrices dans les troubles de la navigation des patients souffrant de MA. En effet, si ces mécanismes semblent altérés dans la DTA [125, 127, 128], cette altération pourrait suivre celle de la mémoire spatiale associée à la progression des lésions de l'hippocampe vers le cortex pariétal [123], largement impliqué dans les mécanismes d'intégration de trajet basés sur le flux optique [150]. Sur ces aspects, le couplage de la RV avec les techniques de neuro-imagerie devrait être riche d'informations. Par ailleurs, comme souligné pour le vieillissement normal, d'autres questions demandent plus d'investigations, et notamment celles relatives aux mécanismes médiateurs de la cognition spatiale et qui sont connus pour être affectés dans la DTA comme les déficits attentionnels et exécutifs, dont l'impact a déjà été démontré par exemple, dans les difficultés de marche et de contrôle d'équilibre dans la DTA [151].

## **CONCLUSION**

Dans le domaine de la cognition spatiale à petite échelle, les études portant sur les différentes fonctions visuospatiales, assez nombreuses avec des tests sur papier sont peu nombreuses avec des applications 3D utilisant la RV. Des études nouvelles devraient aborder le rôle des mécanismes sensori-moteurs dans les déclin des aptitudes spatiales à petites échelle afin notamment de définir des programmes d'entraînement favorables au couplage des capacités motrices et visuospatiales [50].

Concernant la cognition spatiale dans des grands espaces, les applications en RV, en particulier dans la MA 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 « procédurale/egocentrique » (dépendante du noyau caudé) chez les personnes âgées « contrôle ». Néanmoins, des études doivent encore confirmer ces résultats, et dans une approche multifactorielle, il s'agit aussi de mieux comprendre dans le vieillissement, et dans la MA, 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 neuro-fonctionnelles permettra sans aucun doute une meilleure compréhension des difficultés propres au vieillissement, et à la MA, voire même comme l'avancent certains auteurs, contribuer à l'établissement d'un marqueur diagnostique et différentiel du vieillissement pathologique [3, 97, 150]. 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 [27] et aux changements liés au vieillissement normal [104] ou pathologique [134].

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 situation réelle. 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'accompagnent pas systématiquement d'une plainte ou d'une auto-évaluation en relation comme nous avons pu le montrer dans notre étude [63].

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Henderson VW, Mack W, Williams BW. Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Arch Neurol* 1989;46: 391-394.
- [2] Monacelli AM, Cushman LA, Kavcic V et al. Spatial disorientation in Alzheimer's disease: The remembrance of things passed. *Neurology* 2003; 61 (11): 1491-1497.

- [3] Moffat SD. Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? *Neuropsychol Rev* 2009; 19 (4): 478-489.
- [4] Klencklen G, Després O, Dufour A. What do we know about aging and spatial cognition? Reviews and perspectives. *Ageing Res Rev* 2012; (11): 123-135.
- [5] Péruch P, Latini-Corazzini L. Se déplacer et naviguer dans l'espace. In Berthoz A, Vercher J-L eds. *Le traité de la réalité virtuelle: L'homme et l'environnement virtuel*. Paris: Presses de l'Ecole des Mines, 2006: 189-208.
- [6] Denis M, Donikian S. Navigation et cognition spatiale: De l'étude de l'humain réel à la simulation de l'humain virtuel. In Donikian S. eds. *Le traité de la réalité virtuelle, vol 5: Les humains virtuels*. Paris: Presses des Mines, 2009: 285-301.
- [7] Loomis, JM, Blascovich JJ, Beall AC. Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behav Res Meth Instrum Comput* 1999; 31 (4): 557-564.
- [8] Wilson P. Use of virtual reality computing in spatial learning research. In Foreman N, Gillett N eds. *Handbook of spatial research paradigms and methodologies: Vol. I. Spatial cognition in the child and adult*. Hove, U.K.: Psychology Press, 1997: 181-206.
- [9] Allen G. Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding: Bases for individual differences in spatial cognition and behavior. In Golledge RG, eds: *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1999: 46-80.
- [10] Hegarty M, Waller D. Individual differences in spatial abilities. In Schah P, Miyake A eds. *The Cambridge Handbook of visuospatial thinking*. New York: Cambridge University Press, 2005: 121-169
- [11] Voyer D, Voyer S, Bryden MP. Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychol Bull* 1995; 117 (2): 250-270.
- [12] Hegarty M, Montello DR, Richardson AE et al. Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence* 2006; 34 (2): 151-176.
- [13] Zacks JM, Vettel JM, Michelon P. Imagined Viewer and Object Rotations Dissociated with Event-Related fMRI. *J Cognit Neurosci* 2003; 15 (7): 1002-1018.
- [14] Spiers HJ, Maguire EA. The dynamic nature of cognition during wayfinding. *J Environ Psychol* 2008; 28: 232-249.
- [15] Wiener J, Büchner S, Hölscher C. Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognit Comput* 2009; 9 (2): 1-14.
- [16] Wolbers T, Hegarty M. What determines our navigational abilities? *Trends Cognit Sci* 2010; 14 (3): 138-146.
- [17] Chrastil ER. Neural evidence supports a novel framework for spatial navigation. *Psychonomic Bull Rev* 2013; 20(2): 208-227.
- [18] Jones CM, Braithwaite VA, Healy SD. The evolution of sex differences in spatial ability. *Behav Neurosci* 2003; 117: 403-411.
- [19] Allen GL, Kirasic, KC, Dobson, SH et al. Predicting environmental learning from spatial abilities: An indirect route. *Intelligence* 1996; (22) 327-355.
- [20] Richardson AE, Montello DR, Hegarty M. Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory Cognition* 1999; (27), pp. 741-750.
- [21] Siegel AW, White SH. The development of spatial representations of large-scale environments. In: Reese HW (Ed.): *Advances in child development and behavior 10*. New York: Academic Press, 1975: 9-55.
- [22] Thorndyke PW, Hayes-Roth B. Differences in Spatial Knowledge Acquired from Maps and Navigation. *Cognit Psychol* 1982; 14: 560-589.
- [23] Wolbers T, Weiller C, Büchel C. Neural foundations of emerging route knowledge in complex spatial environments. *Cognit Brain Res* 2004; 21 (3): 401-411.
- [24] O'Keefe J, Nadel L. *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Oxford University Press, 1978.
- [25] Montello DR. A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. In Egenhofer MJ, Golledge RG eds. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. New York: Oxford University Press, 1998: 143-154.
- [26] Ishikawa T, Montello DR. Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognit Psycho* 2006; 52 (2): 93-129.
- [27] Chrastil ER, Warren WH. Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bull Rev* 2012; 19 (1): 1-23.
- [28] Etchamendy N, Bohbot VD. Spontaneous navigational strategies and performance in the virtual town. *Hippocampus* 2007; 17 (8): 595-599.
- [29] Iaria G, Petrides, M, Dagher A et al. Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: Variability and change with practice. *J Neurosci* 2003; 23 (13): 5945-5952.
- [30] Iglói K, Zaoui M, Berthoz A et al. Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus* 2009; 19 (12): 1199-1211.
- [31] Packard MG, Knowlton BJ. Learning and memory functions of the basal ganglia. *Ann Rev Neurosci* 2002; 25: 563-593.
- [32] Hartley T, Maguire EA, Spiers HJ et al. The well-worn route and the path less traveled: Distinct neural bases of route following and wayfinding in humans. *Neuron* 2003; 37 (5): 877-888.
- [33] Passini R, Rainville C, Marchand N et al. Wayfinding in dementia of the Alzheimer type: planning abilities. *J Clin Neuropsychol* 1995; 17(6): 820-832.
- [34] Burgess N. Spatial cognition and the brain. *Ann New York Acad Sci* 2008; 1124: 77-97.
- [35] Spiers HJ, Maguire EA. A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus* 2007; 17 (8): 618-626.
- [36] Latini-Corazzini L, Nesa MP, Ceccaldi M et al. Route and survey processing of topographical memory during navigation. *Psychol Res* 2010; 74 (6): 545-559.
- [37] Spiers HJ. Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia* 2008; 46: 2106-2108.

- [38] Gallistel CR, Cramer AE. Computations on metric maps in mammals, getting oriented and choosing a multi-destination route. *J Exp Biol* 1996; 199: 211-221.
- [39] Loomis JM, Klatzky RL, Golledge RG et al. Human Navigation by path integration. In Golledge RG eds. *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1999; 125-151.
- [40] Gibson, J.J. Perception of the Visual World (Boston, MA: Houghton Mifflin), 1950.
- [41] Tcheang L, Bühlhoff HH, Burgess N. Visual influence on path integration in darkness indicates a multimodal representation of large-scale space. *P Natl Acad Sci Usa* 2011; 108(3): 1152-1157.
- [42] De Beni R, Pazzaglia F, Gardini S. The role of mental rotation and age in spatial perspective-taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Appl Cognitive Psych* 2006; 20 (6) : 807-821.
- [43] Dollinger SMC. Mental rotation performance: age, sex, and visual field differences. *Developmental Neuropsychology* 1995; 11: 215-222.
- [44] Inagaki H, Meguro K, Shimada M et al. Discrepancy between mental rotation and perspective-taking abilities in normal aging assessed by Piaget's Three-Mountain Task. *J Clin Exp Neuropsychol* 2002; 24 (1): 18-25.
- [45] Cronin-Golomb A, Amick M. Spatial abilities in aging, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease. In Boller F. and Cappa SF eds. *Handbook of neuropsychology*: Amsterdam Elsevier, 2001: 119-143.
- [46] Salthouse TA. Reasoning and spatial abilities. In Craik FIM., Salthouse TA eds: *Handbook of aging and cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1992: 167-212.
- [47] Morganti F, Marrakchi S, Urban PP et al. A virtual reality based tool for the assessment of "survey to route" spatial organization ability in elderly population: Preliminary data. *Cognit Process* 2009; 10 (suppl. 2): 257-259.
- [48] Money I, Alexander D, Walker HT (1965). Manual: Standardized road-map test of direction sense. Baltimore: Johns Hopkins Press.
- [49] Reger GM, McGee JS, Van der Zaag C et al. A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *J Clin Exp Neuropsychol* 2003; 25 (8): 1169-1177.
- [50] McGee JS, Van Der Zaag C, Buckwalter JG et al. Issues for the assessment of visuospatial skills in older adults using virtual environment technology. *Cyberpsychol Behav* 2000; 3 (3): 469-482.
- [51] Shepard RN, Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 1971; 171 (3972): 701-703
- [52] Messier J, Adamovich S, Jack D et al. Visuomotor learning in immersive 3D virtual reality in Parkinson's disease and in aging. *Experimental Brain Research* 2007; 179 (3): 457-474.
- [53] Newman MC, Kaszniak AW. Spatial memory and aging: Performance on a human analog of the Morris water maze. *Aging Neuropsychol C* 2000; 7 (2): 86-93.
- [54] Burns PC. Navigation and the mobility of older drivers. *The Journals of Gerontology: Series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 1999; 54: S49-S55.
- [55] Rosenzweig ES, Barnes CA. Impact of aging on hippocampal function: Plasticity, network dynamics, and cognition. *Prog Neurobiol* 2003; 69 (3): 143-179.
- [56] Salthouse TA, Atkinson TM, Berish DE. Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *J Exp Psychol Gen* 2003; 132 (4): 566-594.
- [57] Allen GL, Kirasic KC, Rashotte MA et al. Aging and path integration skill: Kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Percept Psychophys* 2004; 66 (1) : 170-179.
- [58] Kirasic KC. Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning new environments. *Psychol Aging* 1991; 6 (1): 10-18.
- [59] Kirasic KC. Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognit Comput* 2000; (2): 117-134.
- [60] Lipman PD. Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information. *Psychol Aging* 1991; 6: 128-133.
- [61] Lipman PD, Caplan LJ. Adult Age Differences in Memory for Routes: Effects of Instruction and Spatial Diagram, *Psychol Aging* 1992; 7: 435-442.
- [62] Simon SL, Walsh DA, Regnier VA et al. Spatial cognition and neighborhood use: the relationship in older adults. *Psychol Aging* 1992; 7 (3): 389-394.
- [63] Taillade M, Sauzéon H, Dejos M et al. Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application. *Aging, Neuropsychology, and Cognition* 2013; 20(3): 298-319.
- [64] Wilkniss SM, Korol DL, Gold PE et al. Age-related differences in an ecologically based study of route learning. *Psychol Aging* 1997; 12 (2): 372-375.
- [65] Cushman LA, Stein K, Duffy CJ. Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology* 2008; 71 (12): 888-895.
- [66] Meulenbroek O, Petersson KM, Voermans N et al. Age differences in neural correlates of route encoding and route recognition. *NeuroImage* 2004; 22 (4): 1503-1514.
- [67] Foreman N, Stanton-Fraser D, Wilson PN et al. Transfer of spatial knowledge to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environ Behav* 2005; 37 (2): 275-292.
- [68] L ovd en M, Herlitz A, Schellenbach M et al. Quantitative and qualitative sex differences in spatial navigation: Cognition and Neurosciences. *Scand J Psychol* 2007; 48 (5): 353-358.
- [69] S j linder M, H ok K, Nilsson L-G et al. Age differences and the acquisition of spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an overview map as a navigation aid. *Int J Hum Comput Stud* 2005; 63 (6): 537-564.
- [70] Gras D, Daniel MP, Labiale G et al. Effet du vieillissement sur la mémorisation d'itin raires réels : l'importance de la mémoire de travail et de la mémoire  pisodes. *Geriatr Psychol Neuropsychiatr Vieil* 2012; 10 (4): 463-470.
- [71] Head D, Isom M. Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behav Brain Res* 2010; 209 (1): 49-58.
- [72] Iaria G, Palermo L, Committeri G et al. Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behav Brain Res* 2009; 196 (2): 187-191.

- [73] Liu I, Levy RM, Barton, JJS et al. Age and gender differences in various topographical orientation strategies, *Brain Res* 2011; 1410: 112-119.
- [74] Plancher G, Nicolas S, Piolino P. Contribution of virtual reality to neuropsychology of memory: Study in aging. *Psychol Neuropsychia* 2008; 6 (1), 7-22.
- [75] Plancher G, Gyselinck V, Nicolas S et al. Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology* 2010; 24 (3): 379-390.
- [76] Zakzanis KK, Quintin G, Graham SJ et al. Age and dementia related differences in spatial navigation within an immersive virtual environment. *Med Sci Mon Int Med J Exp Clin Res* 2009; 15 (4): CR140-CR150.
- [77] Jansen P, Schmelter A, Heil M. Spatial knowledge acquisition in younger and elderly adults: A study in a virtual environment. *Exp Psychol* 2010; 57 (1): 54-60.
- [78] Head D, Isom M. Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behav Brain Res* 2010; 209 (1): 49-58.
- [79] Moffat SD, Elkins W, Resnick SM. Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiol Aging* 2006; 27 (7): 965-972.
- [80] Bückner RL. Memory and executive functions in aging and AD: multiple factors that cause decline and reserve factors that compensate. *Neuron* 2004; 44: 195-208.
- [81] Braver TS, West R. Working memory, executive control and aging. In: Craik FIM, Salthouse TA eds. *Handbook of aging and cognition*, 3rd ed. New York: Psychology Press 2008: 311-372.
- [82] Antonova E, Parslow D, Brammer M et al. Age-related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory* 2009; 17 (2): 125-143.
- [83] Driscoll I, Hamilton DA, Petropoulos H et al. The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebr Cortex* 2003; 13: 1344-1351.
- [84] Driscoll I, Hamilton DA, Yeo RA et al. Virtual navigation in humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning. *Horm Behav* 2005; 47 (3): 326-335.
- [85] Laurance HE, Thomas KGF, Newman MC et al. Older adults map novel environments but do not place learn: Findings from a computerized spatial task. *Aging Neuropsychol Cognit* 2002; 9 (2): 85-97.
- [86] Moffat SD, Kennedy KM, Rodrigue KM et al. Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebr Cortex* 2007; 17 (6): 1274-1282.
- [87] Moffat SD, Resnick SM. Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behav Neurosci* 2002; 116 (5): 851-859.
- [88] Schoenfeld R, Lehmann W, Leplow B. Effects of age and sex in mental rotation and spatial learning from virtual environments. *J Indiv Differ* 2010; 31 (2): 78-82.
- [89] Thomas KGF, Laurance HE, Luczak SE et al. Age-related changes in a human cognitive mapping system: Data from a computer-generated environment. *Cyberpsychol Behav* 1999; 2 (6): 545-566.
- [90] Morris R, Garrard P, Rawlins J et al. Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature* 1982; 297: 681-683.
- [91] Etchamendy N, Konishi, K, Pike, GB et al. Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: A study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus* 2012 ; 22(4): 869-880.
- [92] Rodgers MK, Sindone JA, Moffat SD. Effects of age on navigation strategy. *Neurobio Aging* 2012; 33 (1): 202.e15-202.e22.
- [93] Kalia AA, Legge GE, Giudice NA. Learning building layouts with non-geometric visual information: The effects of visual impairment and age. *Perception* 2008; 37 (11): 1677-1699.
- [94] Moffat SD, Zonderman AB, Resnick SM. Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiol Aging* 2001; 22 (5): 787-796.
- [95] Bohbot VD, McKenzie S, Konishi K et al. Virtual navigation strategies from childhood to senescence: evidence for changes across the life span. *Front Aging Neurosci* 2012; 4 (28).
- [96] Harris MA, Wiener JM, Wolbers T. Aging specifically impairs switching to an allocentric navigational strategy. 2012; 4(29)
- [97] Lithfous S, Dufour A, Després O. Spatial navigation in normal aging and the prodromal stage of Alzheimer's disease: Insights from imaging and behavioral studies. *Ageing Res Rev* 2012; 12: 201-213.
- [98] Healton RK, Chelune GJ, Talley JL et al. Wisconsin Card Sorting Test manual (rev. eds.). Odessa, FL: Psychological Assessment Resources, 1993.
- [99] Harris MA, Wolbers T. Ageing effects on path integration and landmark navigation. *Hippocampus* 2012; 22(8): 1770-1780.
- [100] Mahmood O, Adamo D, Briceno E et al. Age differences in visual path integration. *Behav Brain Res* 2009; 205 (1): 88-95.
- [101] Adamo DE, Briceño EM, Sindone JA et al. Age differences in virtual environment and real world path integration. *Front Aging Neurosci* 2012; 4.
- [102] Dennis NA, Cabeza R (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. In Craik, FIM, Salthouse TA eds. *The handbook of aging and cognition*. Psychology Press, New York and Hove, 311-372.
- [103] Lövdén M, Herlitz A, Schellenbach M et al. Quantitative and qualitative sex differences in spatial navigation: Cognition and Neurosciences. *Scand J Psychol* 2007; 48 (5): 353-358.
- [104] Taillade M, Sauzón H, Arvind Pala P et al. (2013). Age-related wayfinding differences in naturalistic large-scale environments: Detrimental Motor controlling effects are mediated by executive and memory decline? *Plos One* 8(7): e67193.
- [105] Doumas M, Smolders C., Krampe RT. Task prioritization in aging: Effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Exp Brain Res* 2008; 187 (2): 275-281.



- [106] Li KZH, Krampe, RT, Bondar A. An ecological approach to studying aging and dual-task performance. In Engle RW Sedek U, von Hecker G, McIntosh DN eds. *Cognitive limitations in aging and psychopathology: Attention, working memory, and executive functions*. New York: Cambridge University Press, 2005: 190-218.
- [107] Lindenberger, U, Marsiske M, Baltes PB. Memorizing while walking: Increase in dual-task cost from young adulthood to old age. *Psychol Aging* 2000; 15 (3): 417-436.
- [108] Baldwin CL. Designing in-vehicle technologies for older drivers: Applications of sensory-cognitive interaction theory. *Theor Issues Ergon Sci* 2002; 3 (4): 307-329.
- [109] Déjos M, Sauzéon H, Taillade M et al. Age-related differences and cognitive correlates of self-reported and direct navigation performance: effect of the real and virtual test condition manipulation. *J Exp Psychol Appl* 2013 (submitted).
- [110] Montello DR, Lovelace KL, Golledge RG, Self CM. Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Ann Assoc Am Geogr* 1999; 89(3) : 515-534.
- [111] Woolley DG, Vermaercke B, de Beeck HO et al. Sex differences in human virtual water maze performance: Novel measures reveal the relative contribution of directional responding and spatial knowledge. *Behav Brain Res* 2010; 208(2): 408-414.
- [112] Previc F. The neuropsychology of 3D space. *Psychol Bull* 1998; 124(2): 123-164.
- [113] Brodaty H, Moore CM. The clock drawing test for dementia of the Alzheimer's type: A comparison of three scoring methods in a memory disorders clinic. *Int J Geriatr Psychiatr* 1997; 12 (6): 619-627.
- [114] Kaskie B, Storandt M. Visuospatial deficit in dementia of the Alzheimer type. *Arch Neurol-Chicago* 1995; 52 (4): 422-425.
- [115] Armstrong CL, Cloud B. The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal aging. *Neuropsychology* 1998; 12 (2): 208-217.
- [116] Rainville C, Marchand N, Passini R. Performances of patients with a dementia of the Alzheimer type in the Standardized Road-Map test of Direction Sense. *Neuropsychologia* 2002; 40 (5): 567-573.
- [117] McShane R, Gedling K, Keene J et al. Getting lost in dementia: a longitudinal study of a behavioral symptom. *Int Psychogeriatr* 1998; 10 (3): 253-260.
- [118] Morris RG, Kopelman MD. The memory deficits in Alzheimer-type dementia: a review. *Q J Exp Psychol* 1986; 38 (4): 575-602.
- [119] Hodges JR. Alzheimer's centennial legacy: Origins, landmarks and the current status of knowledge concerning cognitive aspects. *Brain* 2006; 129 (11): 2811-2822.
- [120] Kalová E, Vlček K, Jarolímová E et al. 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 (2): 175-186.
- [121] Kessels RPC, Feijen J, Postma A. Implicit and explicit memory for spatial information in Alzheimer's disease. *Dement Geriatr Cognit Disord* 2005; 20 (2-3): 184-191.
- [122] Uc EY, Rizzo M, Anderson SW et al. Driver route-following and safety errors in early Alzheimer disease. *Neurology* 2004; 63 (5): 832-837.
- [123] Blennow K, de Leon MJ, Zetterberg H. Alzheimer's disease. *Lancet* 2006; 368 (9533): 387-403.
- [124] DeIpoli AR, Rankin KP, Mucke L et al. Spatial cognition and the human navigation network in AD and MCI. *Neurology* 2007; 69 (10): 986-997.
- [125] Duffy CJ, Cushman L, Kavcic V. Visuospatial disorientation in Alzheimer's disease: Impaired spatiotemporal integration in visual information processing. In Cronin-Golomb A, Hof PR eds. *Vision in Alzheimer's disease: Interdisciplinary Topics in Gerontology*. Basal, Karger, 2004: 155-172.
- [126] Kavcic V, Fernandez R, Logan D et al. Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain* 2006; 129 (3): 736-746.
- [127] Mapstone M, Dickerson K, Duffy CJ. Distinct mechanisms of impairment in cognitive ageing and Alzheimer's disease. *Brain* 2008; 131 (6): 1618-1629.
- [128] Kavcic V, Duffy CJ. Attentional dynamics and visual perception: Mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Brain* 2003; 126 (5): 1173-1181.
- [129] Mack JL, Patterson MB. Executive dysfunction and Alzheimer's disease: Performance on a test of planning ability, the Porteus Maze Test. *Neuropsychology* 1995; 9 (4): 556-564.
- [130] Jheng S-S, Pai M-C. Cognitive map in patients with mild Alzheimer's disease: A computer-generated arena study. *Behav Brain Res* 2009, 200 (1): 42-47.
- [131] Teng E, Squire LR. Memory for places learned long ago is intact after hippocampal damage. *Nature* 1999; 400 (6745): 675-677.
- [132] Rosenbaum RS, Gao F, Richards B et al. "Where to?" Remote memory for spatial relations and landmark identity in former taxi drivers with Alzheimer's disease and encephalitis. *J Cognit Neurosci* 2005; 17 (3): 446-462.
- [133] Burgess N, Trinkler I, King J et al. Impaired allocentric spatial memory underlying topographical disorientation. *Rev Neurosci* 2006; 17 (1-2): 239-251.
- [134] Plancher G, Tirard A, Gyselinck V et al. Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: Influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia* 2012 (in press).
- [135] Delis DC, Kramer JH, Kaplan E et al. The California Verbal Learning Test. (NY): Psychological Corporation, 1987.
- [136] Widmann CN, Beinhoff U, Riepe MW. Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging* 2012; 33(2): 297-303.
- [137] Parslow DM, Rose D, Brooks B et al. Allocentric spatial memory activation of the hippocampal formation measured with fMRI. *Neuropsychology* 2004; 18 (3): 450-461.

- [138] Maguire EA, Frackowiak RSJ, Frith CD. Recalling routes around London: Activation of the right hippocampus in taxi drivers. *J Neurosci*, 17 (18); 1997: 7103-7110.
- [139] Voermans NC, Petersson KM, Daudey L et al. Interaction between the human hippocampus and the caudate nucleus during route recognition. *Neuron* 2004; 43 (3): 427-435.
- [140] Petersen RC, Stevens JC, Ganguli M et al. Practice parameter: Early detection of dementia: Mild cognitive impairment (an evidence-based review). *Neurology* 2001; 56 (9): 1133-1142.
- [141] Dubois B, Albert ML. Amnestic MCI or prodromal Alzheimer's disease? *Lancet Neurol* 2004; 3 (4): 246-248.
- [142] Laczó J, Andel R, Vlček K et al. Spatial Navigation and APOE in Amnestic Mild Cognitive Impairment. *Neurodegener Dis* 2011; (8): 169-177.
- [143] Lee J-H, Mraz RP, Zakzanis KK et al. Spatial ability and navigation learning in a virtual city. In Wiederhold BK, Riva G, Bullinger AH eds. *Annual review of cybertherapy and telemedicine*. Interactive Media Institute, San Diego, 2005: 151-157.
- [144] Tippett WJ, Lee J-H, Zakzanis KK et al. Visually navigating a virtual world with real-world impairments: A study of visually and spatially guided performance in individuals with mild cognitive impairments. *J Clin Exp Neuropsychol* 2009; 31 (4): 447-454.
- [145] Delpolyi AR, Rankin KP, Mucke L et al. Spatial cognition and the human navigation network in AD and MCI. *Neurology* 2007; 69 (10): 986-997.
- [146] Weniger G, Ruhleder M, Lange C et al. Egocentric and allocentric memory as assessed by virtual reality in individuals with amnestic mild cognitive impairment. *Neuropsychologia* 2011; 49 (3): 518-527.
- [147] Weniger G, Siemerikus J, Schmidt-Samoa C et al. The human parahippocampal cortex subserves egocentric spatial learning during navigation in a virtual maze. *Neurobiol Learn Mem* 2010; 93 (1): 46-55.
- [148] Wolbers T, Büchel C. Dissociable retrosplenial and hippocampal contributions to successful formation of survey representations. *J Neurosci* 2005; 25 (13): 3333-3340.
- [149] Bellassen V, Igloi K, Cruz de Souza L et al. Temporal order memory assessed during spatiotemporal navigation as a behavioral cognitive marker for differential Alzheimer's disease diagnosis. *J Neurosci* 2012; 32 (6): 1942-1952.
- [150] Duffy CJ, Tetewsky SJ, O'Brien H. Cortical motion blindness in visuospatial AD. *Neurobiol Aging* 2000; 21 (6): 867-869.
- [151] Sheridan PL, Hausdorff JM. The role of higher-level cognitive function in gait: Executive dysfunction contributes to fall risk in Alzheimer's disease. *Dement Geriatr Cognit Disord* 2007; 24 (2): 125-137.

Psychologie française

Elsevier Editorial System(tm) for

Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Apports de la réalité virtuelle aux approches neurocognitives du vieillissement normal ou pathologique: où en est-on réellement?

Article Type: Analyse de la littérature

Corresponding Author: Mrs Marie Déjos, PhD

Corresponding Author's Institution: Université Bordeaux Segalen

First Author: Marie Déjos, PhD

Order of Authors: Marie Déjos, PhD; Prashant Arvind Pala; Mathieu Taillade; Bernard N'Kaoua; Hélène Sauzéron

Suggested Reviewers: Gaen Plancher  
gaen.plancher@univ-tours.fr

Opposed Reviewers:

Mots clés : Vieillissement, démence, réalité virtuelle, handicap cognitif.

*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).*

---

*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 AGÉE

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 (Sikkas 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 compromis 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 & Sauzéron, 2008). Ces simulations offrent des mesures contrôlées, paramétrées, et standardisées, dans de bonnes conditions de sécurité optimisées pour les

1 utilisateurs et ce lors d'AVQ simulées (Lee et al. 2003), permettant simultanément l'analyse  
2 structuro-cognitive des troubles et l'analyse fonctionnelle du handicap du sujet le cas échéant  
3 (Le Gall & Allain, 2001).  
4

5 [insert tableau 1]

6 *Tableau 1 : Synthèse des avantages méthodologiques des outils RV dans le domaine des*  
7 *investigations neuropsychologiques (Adapté de Rizzo et al., 2004)*  
8  
9

10 Si les avantages offerts par la RV ont été rapidement valorisées dans les recherches menées  
11 auprès de l'adulte cérébro-lésé jeune (eg. Klinger, 2006), le développement des applications  
12 RV dédiées à la personne âgée a été ralenti par les contraintes dites d'« utilisateurs âgés »,  
13 mais aujourd'hui ces dernières sont en passe d'être maîtrisées.

14 En effet, il y a 10 ans, McGee et al. (2000) dénonçaient quatre principales contraintes à  
15 l'utilisation de la RV auprès d'utilisateurs âgés, à savoir 1) La techno-phobie (anxiété à utiliser  
16 de nouveaux produits) ; 2) le statut perceptivo-moteur ; 3) le mal des simulateurs<sup>1</sup>; 4) la  
17 complexité d'utilisation des Interfaces Homme-Machine (IHM). Avec la présence accrue  
18 d'IHM et de technologies au quotidien, la techno-phobie autrefois associée au grand âge n'est  
19 plus réellement un obstacle, et les personnes âgées sont de plus en plus en mesure de les  
20 utiliser, même si certains aménagements dans la conception des IHM demeurent  
21 incontournables (eg. simplification des modalités de commande de l'interface) (Hawthorn,  
22 2000 ; Zajicek, 2003 ; Sayers, 2004 ; Czaja et al., 2007). Ces aménagements, souvent en  
23 rapport avec le statut perceptivo-moteur et cognitif des âgés, sont issus du retour d'expérience  
24 des études en IHM menées depuis une dizaine d'années et font l'objet aujourd'hui de normes  
25 précises (normes ISO, 2008, pour détails, voir Charness, 2008). Notons que si les changements  
26 physiques liés à l'âge peuvent être importants, dans le domaine visuel, auditif, vestibulaire ou  
27 moteur (eg. Whitbourne, 1998), la RV par ses interfaces et interacteurs multisensoriels permet  
28 de contourner les incapacités perceptivo-motrices de la personne. Rappelons également que la  
29 perception 3D sollicitée dans les applications de RV est préservée jusqu'à un âge avancé (plus  
30 de 75 ans) (Yetka et al., 1998). Concernant le mal des simulateurs<sup>1</sup>, il est rapporté dans la  
31 littérature qu'il s'agit d'un phénomène marginal (5%-10%) même s'il augmente un peu avec  
32 l'âge<sup>2</sup> (Liu et al. 1999 ; Arns & Cerney, 2005). Il est de plus possible, de minimiser ces effets  
33 secondaires en suivant des recommandations simples (pour revue voir, Morrow & Rogers,  
34 2008) comme privilégier un mur d'affichage plutôt qu'un casque de visualisation (eg.  
35 Keszyues et al., 2000 ; Regan & Price, 1994).

36 La prise en compte de ces contraintes liées à l'utilisateur âgé permet aujourd'hui de disposer  
37 d'interfaces adaptées, simples et faciles d'utilisation, et donc qui sont mieux acceptées, c'est-à-  
38 dire considérées par les utilisateurs comme utiles (contentement et intérêt perçu) et utilisables  
39 (sentiment d'efficacité à l'utilisation) et alors moins anxiogènes pour la personne (Czaja et al.,  
40 2007).  
41

42 Ces progrès interfaciels amènent aujourd'hui au déploiement des applications RV dans les  
43 études neuro-comportementales puisque les personnes âgées sont à même de bien les tolérer  
44 mêmes avec peu d'expériences en matière d'utilisation d'outils numériques. De plus, l'aspect  
45 ludique et le sentiment d'efficacité étant importants, les personnes âgées manifestent un  
46 sentiment de satisfaction à l'utilisation de ce mode d'évaluation (pour revue Déjos et al., 2012).  
47

48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55 <sup>1</sup> Troubles résultant d'un conflit entre les informations perceptuelles reçues par les diverses modalités (visuelle,  
56 proprioceptives...) ou la réadaptation dont le sujet doit faire peuvent après l'utilisation de l'environnement  
57 virtuel. Les symptômes peuvent inclure des nausées, une fatigue oculaire, une désorientation, des problèmes  
58 de coordination perceptivo-motrice, ect. (Kennedy et al., 1992).

59 <sup>2</sup> Il n'y a pas de différence entre personnes âgées « contrôles » et personnes âgées avec démence concernant la  
60 présence de mal des simulateurs (Flynn et al. 2003).  
61  
62  
63  
64  
65

## 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 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 N100<sup>3</sup> 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

<sup>3</sup> 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 & Annon-Vento, 1998).



RV. En revanche, une altération de la MMN<sup>4</sup> 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 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 âgés 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

<sup>4</sup> 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.

(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-modale<sup>5</sup> 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 ;

<sup>5</sup> 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.

1 Stolwyk et al., 2006 ; Zesiewicz et al., 2002 ; Rizzo et al., 2011). Il a par exemple, été montré  
2 que lors d'une tâche de conduite dans de mauvaises conditions de visibilité, les déficits  
3 attentionnels des patients MP sont majorés comparés aux performances des âgés (Uc et al.,  
4 2009). Les mesures d'attention visuelle, de capacités visuo-constructives et de perception des  
5 mouvements sont apparus comme étant les meilleurs prédicteurs des performances de contrôle  
6 de trajectoire et des risques de collisions lors d'une conduite en faible visibilité chez les  
7 patients MP. Ces résultats ont été retrouvés en condition de visibilité normale (eg. Uc et al.  
8 2007 ; Ball et al., 1993 ; Rizzo et al., 1997, 2001 ; Owsley et al., 1998). Du côté de la DTA,  
10 récemment Rizzo et al. (2011) ont montré que les comportements déviants de conduite  
11 précédant le crash des patients DTA étaient prédits par leurs troubles visuo-spatiaux,  
12 attentionnels, et leur ralentissement dans le traitement de cibles mouvantes. De plus, alors que  
13 la corrélation entre les échelles de sévérité de la démence et les performances aux activités de  
14 conduite n'est parfois pas évidente chez les DTA, elle est en revanche systématiquement  
15 observée dans les études chez les MP en utilisant l'échelle unifiée d'évaluation de la MP  
16 (UPDRS motrice et AVQ), le H-Y<sup>6</sup> (Hoehn & Yahr, 1967) ou le MMSE. L'étude de Zesiewicz  
17 (2002) a par exemple révélé que la propension pathologique des MP à entrer en collision variait  
18 selon le degré de sévérité de la maladie. Les sujets MP qui avaient le score le plus bas au  
19 MMSE étaient également ceux qui avaient totalement arrêté de conduire et qui montraient le  
20 plus de collisions comparés aux âgés lors d'une activité de conduite simulée en RV. De même,  
21 un taux d'accidents maximum (90 %) correspondait au stade le plus avancé sur l'échelle H-Y  
22 de désordre moteurs associés à la MP tandis que le stade le plus faible correspondait à un taux  
23 d'accidents équivalent à celui constaté dans le vieillissement normal (20 %).

24 Ces premiers résultats soulignent l'intérêt de la RV pour l'étude des mécanismes attentionnels  
25 et de leurs répercussions dans les AVQ telles que la conduite automobile. Le caractère  
26 écologique et dynamique des mesures, rendant plus sensibles ces dernières pour la  
27 caractérisation des profils pathologiques dans le cadre du vieillissement pathologique.

### 33 CAPACITES VISUO-SPATIALES (VS)

34 Les capacités visuo-spatiales ont été décrites par Lohman (1993) comme l'aptitude à générer,  
35 retenir, récupérer et transformer une image visuelle bien structurée. Elles ne représentent pas un  
36 construit unique et ont été séparées en différents facteurs dont le nombre et la nature varient  
37 selon les auteurs (voir Hegarty & Waller, 2005 pour revue). La description la plus récente  
38 dissocie les aptitudes spatiales à *petite échelle* correspondant à la manipulation mentale  
39 d'objets et à *grande échelle* comme l'apprentissage et la navigation dans des grands espaces  
40 (Hegarty et al., 2006). Cette distinction s'appuie sur la faible corrélation rapportée entre les  
41 tests visuospatiaux de type « papier-crayon » (rotation mentale, tests de visualisation spatiale de  
42 Guilford & Zimmermann, ...) et les performances d'apprentissage spatial et de navigation en  
43 condition réelle, qui nécessitent d'intégrer un ensemble d'informations (visuelles, vestibulaires,  
44 proprioceptives...) permettant de construire une représentation interne de l'espace (de type «  
45 Route » ou de type « configurationnelle/carte cognitive») et d'effectuer des transformations ou  
46 des inférences afin de décrire, représenter ou naviguer dans cet espace (Hegarty et al., 2006).  
47 L'étude de la cognition spatiale à grande échelle est certainement l'un des domaines d'étude  
48 ayant le plus bénéficié des outils RV (eg. Moffat, 2009 ; Wolbers & Hegarty, 2010 ; Brooks et  
49 al., 1999 ; Waller et al., 2004 ; 2007 ; Moffat et al., 2002 ; 2006 ; 2007), puisque ces derniers  
50 offrent des conditions d'étude de la locomotion et de la navigation dans des grands espaces en

51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58 <sup>6</sup> Echelle évaluant les désordres moteurs (et non cognitifs), objectivant à la fois le trouble moteur et les incapacités du sujet au  
59 quotidien.  
60  
61  
62  
63  
64  
65

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).

**Viellissement normal : 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 Morris<sup>7</sup> (Newman et al., 2000). Ce type de tâche a très vite trouvé un corolaire virtuel à partir duquel des études sur le vieillissement ont été réalisés, 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.

., 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 ;

<sup>7</sup> 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)

1 Moffat, et al ; 2006 ; Moffat et al.. 2007, pour revue Moffat, 2009). Pour les auteurs de ces  
2 études, ces résultats sont en faveur d'une origine multi-factorielle des troubles de la navigation  
3 chez le sujet âgé, impliquant notamment des composants exécutifs, mnésiques et attentionnels.  
4 Dans la même veine, nous avons récemment montré à l'aide d'une application simulant un  
5 quartier virtuel, que la reproduction en réel, d'un trajet appris en virtuel était altérée chez les  
6 âgés (erreurs de directions, temps de décision directionnelle augmenté) et que ces difficultés  
7 étaient corrélés au déclin mnésiques et exécutifs mesurés avec des tâches conventionnelles. Si  
8 les performances de navigation chez les sujets jeunes étaient inversement corrélés aux auto-  
9 estimations de leurs difficultés quotidiennes à s'orienter et naviguer dans les grands espaces  
10 (ie., auto-questionnaires), de manière plus inquiétante cela n'était pas le cas pour les sujets âgés  
11 dont les estimations minimisaient les difficultés rencontrées, suggérant des difficultés  
12 métacognitives supplémentaires (Taillade et al., 2012).

13 Notons qu'à coté de ces études très orientées « cognition », d'autres études se sont intéressées  
14 au rôle de la composante dite « locomotrice » dans le vieillissement de la cognition spatiale à  
15 grande échelle. En effet, par ses interfaces modulables, les outils RV permettent de créer des  
16 situations de privation sensorielle et/ou motrice et permettent donc l'étude du rôle sélectif de  
17 chaque source de stimulation sensori-motrice. Dans ce contexte les mécanismes sensorimoteurs  
18 dits *d'intégration de trajet* ont été étudiés tels que le rôle des processus de traitement du flux  
19 optique (Mahmood et al., 2009) ou encore des informations vestibulaires et kinesthésiques  
20 (Allen et al. 2004). Et, de manière concluante, il a été montré que les troubles de navigation  
21 spatiale avec l'âge trouvaient également une origine dans ces mécanismes au cœur du dialogue  
22 cognition-action.  
23

24 Au final, concernant les effets du vieillissement sur la cognition spatiale, les applications RV  
25 ont permis d'une part, de confirmer en situations 3D les études précédentes et, d'autre part  
26 d'apporter une cartographie analytique des défaillances cognitives et sensori-motrices qui  
27 orchestrent les troubles de la navigation de la personne âgée.  
28

29  
30  
31  
32  
33 **Vieillesse pathologique : Cognition spatiale à petite échelle :** Des troubles sont  
34 rapportés chez les patients MCI et DTA (Henderson et al., 1989 ; voir Cronin-Golomb &  
35 Amick, 2001, pour revue) avec notamment des déficits concernant l'exploration spatiale  
36 (Previc, 1998), la détection du mouvement (O'Brien et al., 2001 ; Mapstone, et al., 2008), et de  
37 la rotation de figures (Kaskie & Storandt, 1995; Armstron & Cloud, 1998 ; O'Brien et al., 2001  
38 ; Rainville et al., 2002). Actuellement, à notre connaissance, aucun équivalent à ces tests n'a été  
39 développé en RV pour l'étude de ces mécanismes dans la DTA. D'une manière encore plus  
40 surprenante, très peu d'études ont été réalisées dans la MP où préfigurent les troubles visuo-  
41 spatiaux dans le tableau clinique. La MP entraîne en effet un déficit des fonctions visuelles (Uc  
42 et al. 2005 ; Davidsdottir et al. 2005), des aptitudes spatiales à petite échelle (Cronin-Golomb &  
43 Amick, 2001 ; Davidsdottir et al., 2008 ; Lee et al., 1998 ; Amick et al., 2006 ; Cronin-Golomb  
44 & Braun, 1997) et un défaut d'intégration des informations visuelles et proprioceptives pour le  
45 contrôle du mouvement (Adamovich et al., 2001).  
46

47 Ces altérations visuo-spatiales dans la MP ont été retrouvées dans un étude en RV qui proposait  
48 des tâches nécessitant la manipulation d'objets (Virtual Tray of Objects Task) (Stirke &  
49 Foreman, 2005). Malheureusement, dans cette étude, les résultats n'ont pas été comparés aux  
50 tests classiques, ni mis en relation avec des évaluations portant sur les difficultés quotidiennes  
51 ou la sévérité de la maladie, en conséquence toute conclusion sur la validité de ces nouveaux  
52 outils RV reste hasardeuse.  
53

54 Au total, les aptitudes spatiales à petite échelle dans la DTA ou la MP restent à être explorer  
55 dans les dispositifs RV.  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1 *Cognition spatiale à grande échelle* : Les capacités à grande échelle ont, quant à elles, fait  
2 l'objet d'un plus grand nombre d'études. La DTA est associée à une désorientation spatiale et  
3 des comportements d'errance pouvant apparaître à des stades précoces (Henderson et al., 1989 ;  
4 Ballard et al., 1991; Passini et al., 1995; Pai & Jacobs , 2004 ; Algase et al., 2004), qui sont  
5 eux-mêmes facteurs de risque d'accidents et souvent à l'origine du placement en institution  
6 (McShane et al., 1998 ; Rowe, 2003). Certains auteurs avancent même que l'altération des  
7 performances d'apprentissage spatial et de navigation dans des grands espaces constitueraient  
8 en soi des marqueurs d'une évolution vers la démence (Moffat, 2009 ; Laczo et al. 2009).

10 Les études réalisées en réel, reproduisant le test de la piscine de Morris (Hort et al., 2007 ;  
11 Laczo et al., 2009) ou des environnements plus écologiques d'apprentissage spatial (Cherrier et  
12 al., 2001 ; Kalova et al., 2005 ; Kessels et al., 2005 ; Monacelli et al., 2003) rapportent toutes  
13 une baisse significative des performances chez les patients MCI, baisse encore plus importante  
14 chez les DTA.

16 La mise en lien des mesures d'atrophie cérébrale des patients et des performances  
17 d'apprentissage spatial et de navigation en condition réelle à permis de montrer que chez des  
18 patients présentant un MCI ou une DTA, l'intégrité de l'hippocampe et du lobule intra-pariétal  
19 droit prédisait les performances de mémoire spatiale en réel de ces personnes, contrairement  
20 aux tests psychométriques classiques (DeIpolyi et al., 2007). Les mesures écologiques  
21 d'apprentissage spatial chez les personnes âgées seraient donc de bons marqueurs précoces des  
22 troubles cognitifs et des lésions neurologiques associés à la DTA. Concernant les études en RV,  
23 Tippett et al. (2009) ont évalué les performances de mémoire de route et de contrôle des  
24 mouvements dans un quartier virtuel chez des sujets MCI et des sujets âgés. Ils ont mis leurs  
25 résultats en relation avec des tests classiques de mémoire à court terme, de mémoire visuelle et  
26 du fonctionnement exécutif, avec pour résultat une bonne corrélation de leur indices en RV  
27 avec les tests classiques mais sans discrimination possible entre les personnes MCI et contrôles.  
28 Ce dernier résultat est expliqué par les auteurs comme résultant probablement d'un manque de  
29 précision des mesures, d'un faible niveau de complexité du parcours, et d'une corrélation trop  
30 importante avec les tests classiques révélant leur faible valeur de dépistage.

32 A l'inverse, et de manière convaincante, Cushman et al. (2008) ont réalisé une étude en RV  
33 dont les résultats témoignaient de la pertinence des mesures en RV pour discriminer différents  
34 groupes de sujets (jeunes, âgés, MCI et DTA dans cette étude). Sur la base d'une tâche  
35 d'apprentissage et de navigation dans une réplique RV d'un hôpital, des patients (MCI et DTA)  
36 étaient bien distingués du groupe contrôle par les tâches de positionnement de photos, et de  
37 rappel libre de repère ou d'objets présents sur le parcours, tout comme dans la version réelle du  
38 test de navigation. Ceci confère à la tâche RV utilisée une excellente validité écologique tout en  
39 confirmant sa possible utilisation dans le diagnostic précoce de la démence [85% des personnes  
40 pouvaient être classées correctement (saines vs. pathologiques) par ce test]. Ces résultats, de  
41 manière générale, viennent étayer ceux déjà obtenus montrant des difficultés de mémoire  
42 spatiale et de navigation, en situations réelles de conduite (O'Brien et al., 2001 ; Uc et al.,  
43 2004) ou de locomotion (eg. Passini et al., 1995, 2000 ; Cherrier et al., 2001 ; Rainville et al.,  
44 2001, Monacelli et al., 2003 ; Kavcic et al., 2006 ; DeIpolyi et al., 2007 ; O'Brien et al., 2001 ;  
45 Mapstone et al., 2008).

47 La région médiotemporale, dont le rôle est connu comme critique dans la construction des  
48 représentations spatiales configurationnelles (Burgess, 2008), constitue la cible la plus précoce  
49 des lésions caractéristiques de la DTA (Blennow et coll., 2006). L'étude des liens entre ce  
50 support anatomique et les performances des sujets constitue donc une voie d'investigation  
51 privilégiée dans le cadre du diagnostic précoce de la maladie (voir Hort, et al., 2007 ; Laczo et  
52 al., 2009 ; 2010 ; 2011).

53 Ainsi, Weniger et al. (2011) ont développé des tests de mémoire spatiale et de navigation dans  
54 des EV avec l'objectif de mettre en relation les résultats obtenus en RV par des patients MCI et  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

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.

1 Ainsi, les études sur la cognition spatiale utilisant la RV souffrent encore aujourd'hui de  
2 ne pas mettre systématiquement en relation les performances en RV avec, d'une part, les  
3 performances issues de versions réelles des tests, et d'autre part, avec les mesures des échelles  
4 de diagnostic de la démence et d'évaluation du handicap spatial au quotidien compromettant  
5 ainsi la démonstration de la valeur ajoutée de ces outils (Algase et al., 2007; Chiu et al., 2005).  
6 Malgré cela, la RV et son couplage avec les techniques de neuroimagerie dans le domaine de la  
7 cognition spatiale, a permis des avancées significatives dans la compréhension des mécanismes  
8 à l'origine des troubles de la navigation et de l'apprentissage (encodage, récupération des  
9 connaissances spatiales, planification, mise à jour...) dans les grands espaces dans le cas du  
10 vieillissement normal et pathologique. Elle a également permis de questionner l'utilisation de  
11 tests de mémoire spatiale comme outils de diagnostic précoce de la DTA (voir, Moffat, 2009,  
12 pour revue).

### 13 MEMOIRE EPISODIQUE

14  
15  
16 La mémoire épisodique correspond à la mémoire des événements indexés spatio-  
17 temporellement (Tulving, 2002). Parmi les tests classiquement utilisés pour l'évaluer, on peut  
18 citer le « California Verbal Learning Test » (CVLT ; Delis et al., 1987), le « Wechsler Memory  
19 Scale-Revised » (WMS-R ; Wechsler, 1987) ; ou encore le Grober & Buschke (1987). Il s'agit  
20 de tests utilisant du matériel verbal qui sont d'une part, éloignés de la définition et donc du  
21 concept de mémoire épisodique, et d'autre part, peu écologiques et donc faiblement corrélés  
22 aux évaluations de la mémoire « au quotidien » (Sunderland et al., 1983). Afin de compenser  
23 ses lacunes, plusieurs approches ont été envisagées, comme l'observation directe, des  
24 questionnaires (eg. le QAM, Van Der Linden et al., 1989), des épreuves neuropsychologiques  
25 avec mise en situation (Helmstaedter et al., 1998) où les patients sont testés sur leur capacité à  
26 rappeler des détails de faits se rapportant aux tests passés la semaine précédente, ou encore  
27 des simulations comme le « Rivermead Behavioral Memory Test » (RBMT, Wilson et al.,  
28 1993). Différentes évaluations portant plus sur la composante spatiale de la mémoire  
29 épisodique ont été également développées comme par exemple le « Misplaced Objects Test »  
30 (Crook et al., 1990), qui est un test informatisé de mémoire pour la position d'objets dans une  
31 maison de sept pièces ; voir également le « Spatial Location Memory Test » (Sanchez et al.,  
32 1997), le « Spatial Array Memory Test » (SAMT, Meador et al., 1990) ou la « Room Task »  
33 (Kessels et al., 2005).

34  
35  
36 **Vieillesse normale :** Les difficultés de mémoire épisodique sont couramment rencontrées  
37 chez la personne âgée qu'il s'agisse d'activités mettant en jeu les aspects rétrospectifs (Jones &  
38 Jacoby, 2005 ; Bernard et al., 2007 ; Head et al., 2008) ou prospectifs<sup>8</sup> (Henry et al., 2004 ;  
39 Kliegel et al., 2008 ; McDaniel et al., 2008, pour revue) de cette mémoire. S'il existe des études  
40 chez les sujets jeunes ou cérébro-lésés (eg. Brooks et al., 2002), aucune étude à notre  
41 connaissance n'a étudié la mémoire prospective chez les personnes âgées en utilisant la RV.  
42 Concernant la mémoire rétrospective, il existe actuellement très peu d'études portant sur les  
43 applications en RV et le vieillissement normal ou pathologique. Cet état de chose vient  
44 probablement de la difficulté à simuler une activité mettant en jeu la mémoire épisodique dans  
45 toute sa complexité (un événement, un contexte spatial, temporel, des détails), aussi la plupart  
46 des travaux concerne l'unique composante spatiale de la mémoire épisodique et sera considérée  
47 comme relevant de mesures de navigation ou de mémoire purement spatiale.

48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58 <sup>8</sup> La mémoire prospective a été définie comme la mémoire des actions futures à réaliser (basée sur différents  
59 indices : un événement, le temps (après un certain intervalle de temps ou une heure fixe), ou une action  
60 (Kvavilashvili & Ellis, 1996) et est fortement impliquée dans toutes les AVQ (Schmitter-Edgecombe et al., 2009).



1 Dans le souci de correspondre à la définition de la mémoire épisodique, Plancher et al. (2008 ;  
2 2010) ont étudié l'effet du vieillissement sur les performances d'apprentissage d'événements et  
3 d'objets le long d'un trajet dans une ville virtuelle. Différents tests ont été utilisés afin  
4 d'évaluer les composantes de la mémoire épisodique (quoi, où, quand, détails et un test de  
5 reconnaissance). Deux types d'encodage ont été effectués (incident et intentionnel) ainsi que  
6 deux modes d'interaction (actif vs passif). Leurs résultats principaux sont, un effet du  
7 vieillissement plus important sur la mémoire du contexte et des détails et un encodage  
8 intentionnel moins efficace chez les personnes âgées. Cette étude confirme donc la critique  
9 diminution des performances de mémoire épisodique dans le vieillissement, en particulier  
10 lorsque l'encodage est explicite. De plus la possibilité, avec la RV d'enrichir la tâche  
11 expérimentale en adjoignant aux faits un contexte spatio-temporel ainsi que des détails a permis  
12 de démontrer que ces aspect négligés dans les tests classiques sont les plus touchés dans le  
13 vieillissement. La RV permet donc de tester les concepts théoriques de manière plus précise  
14 mettant à jour une évaluation psychométrique parfois « trop granulaire » avec les tests  
15 traditionnels.

16  
17  
18  
19 **Vieillessement pathologique** : Concernant le vieillissement pathologique, plusieurs études  
20 (Zakzanis et al. 2009 ; Widmann et al., 2010) ont transféré en RV le paradigme d'apprentissage  
21 répétés utilisé classiquement dans le CVLT, mais à notre connaissance une seule exploite les  
22 données en terme de mémoire épisodique (Widmann et al., 2010). Ainsi, dans cette étude les  
23 performances de mémoire épisodique de deux groupes de personnes (âgées vs. DTA précoce)  
24 sont évaluées dans un quartier virtuel dans lequel les personnes devaient mémoriser un trajet et  
25 les enseignes de certains magasins. Différents indices de mémorisation étaient alors utilisés :  
26 apprentissage (évolution du rappel entre les différents essais), rappel libre des noms des  
27 magasins, dessin de la route, positionnement de photos de magasins rencontrés sur le trajet,  
28 reconnaissance de photos de magasins et une tâche de dénomination des magasins. Les  
29 performances à ces tests ont été mises en relation notamment avec les performances des sujets  
30 au test classique de mémoire verbale CVLT de manière à évaluer la valeur ajoutée d'une  
31 évaluation dans un environnement plus naturel. Pour le groupe des personnes âgées contrôles,  
32 les résultats ont montré une correspondance quasi parfaite entre les résultats (rappel libre) au  
33 CVLT et les résultats au test RV. En revanche, pour le groupe de DTA, les performances de  
34 rappel étaient plus faibles avec le test RV (20% des items rappelés) qu'avec la CVLT (40%).  
35 Les auteurs concluent que le paradigme d'apprentissage de liste de mots (CVLT classique)  
36 sous-estime les capacités de mémoire au quotidien. De plus, alors que les performances sur les  
37 tests de reconnaissance (CVLT vs. RV) sont équivalentes pour le groupe des personnes âgées,  
38 les performances sont meilleures en RV comparativement à la CVLT pour les patients DTA.  
39 Ainsi la RV renforce la différence entre les performances de rappel libre et de reconnaissance  
40 chez les DTA. Une évaluation de la mémoire épisodique avec un EV-3D s'avère donc un  
41 meilleur descripteur (moins de faux positifs et négatifs) des déficits dans la DTA ce qui en fait  
42 un bon candidat comme outil de diagnostic précoce de cette maladie.

43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130  
131  
132  
133  
134  
135  
136  
137  
138  
139  
140  
141  
142  
143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174  
175  
176  
177  
178  
179  
180  
181  
182  
183  
184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192  
193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338  
339  
340  
341  
342  
343  
344  
345  
346  
347  
348  
349  
350  
351  
352  
353  
354  
355  
356  
357  
358  
359  
360  
361  
362  
363  
364  
365  
366  
367  
368  
369  
370  
371  
372  
373  
374  
375  
376  
377  
378  
379  
380  
381  
382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428  
429  
430  
431  
432  
433  
434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444  
445  
446  
447  
448  
449  
450  
451  
452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511  
512  
513  
514  
515  
516  
517  
518  
519  
520  
521  
522  
523  
524  
525  
526  
527  
528  
529  
530  
531  
532  
533  
534  
535  
536  
537  
538  
539  
540  
541  
542  
543  
544  
545  
546  
547  
548  
549  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
560  
561  
562  
563  
564  
565  
566  
567  
568  
569  
570  
571  
572  
573  
574  
575  
576  
577  
578  
579  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637  
638  
639  
640  
641  
642  
643  
644  
645  
646  
647  
648  
649  
650  
651  
652  
653  
654  
655  
656  
657  
658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
770  
771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783  
784  
785  
786  
787  
788  
789  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
850  
851  
852  
853  
854  
855  
856  
857  
858  
859  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
900  
901  
902  
903  
904  
905  
906  
907  
908  
909  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
950  
951  
952  
953  
954  
955  
956  
957  
958  
959  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
970  
971  
972  
973  
974  
975  
976  
977  
978  
979  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
1000

comportemental pour le diagnostique 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 ; Tacconat, 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

1 nombreux, révèlent des effets de l'âge souvent majorés (Craick & Bialystock, 2006) ou  
2 équivalents à ceux obtenus dans les tâches de laboratoires traditionnelles (Messier et al, 2007).  
3 Généralement, est rapporté un pattern de déficits comprenant l'augmentation des erreurs de  
4 planification et de persévération, la réduction de la vitesse de traitement ainsi que la présence  
5 de déficits attentionnels. Bien que l'étude de Craik et Bialystock (2006) n'utilisait pas un  
6 dispositif RV immersif, elle mérite d'être citée puisque qu'elle mesurait les performances des  
7 âgées dans une situation multi-tâches informatisée, situation mettant en jeu de nombreux  
8 processus cognitifs comme dans la vie réelle. Craik et Bialystock demandaient aux sujets  
9 jeunes et âgés de commencer, puis d'arrêter de cuisiner le petit déjeuner et de mettre autant de  
10 couverts que possibles entre-temps. Les auteurs faisaient varier la difficulté de la tâche (de 1 à  
11 5 écrans) en augmentant le nombre d'écrans nécessaires pour cuisiner. Par exemple, dans la  
12 condition 1 écran, la table et les aliments à cuisiner étaient vus ensemble tandis que dans la  
13 condition 2 écrans, ils étaient vus séparément, ce qui obligeait les sujets à alterner entre la  
14 tâche distractive (mettre les couverts) et la tâche cible (préparer le petit déjeuner). Les  
15 performances des âgés restaient correctes lorsque le niveau de difficulté était bas, mais  
16 déclinaient au fur et à mesure que la tâche se complexifiait. Lorsque la tâche nécessitait plus de  
17 ressources de traitement et la gestion de plus de tâches simultanément alors les âgés mettaient  
18 plus de temps à préparer la table mais commettaient également plus d'erreurs de persévérations  
19 ou d'oublis dus à une incapacité à alterner entre deux tâches. D'autres résultats sur des  
20 protocoles expérimentaux écologiques mobilisant fortement les processus stratégiques comme  
21 faire les courses (Sjölinger et al., 2005), s'injecter de l'insuline au moment approprié ou  
22 organiser une soirée entre collègues de bureau (Guimond et al., 2006) ont également confirmé  
23 une baisse des performances associée au vieillissement. Ces études en RV montrent qu'il est  
24 désormais possible de simuler des AVQ quasi *in situ* et démontrent l'origine dysexecutive des  
25 difficultés qu'éprouvent les âgés pour effectuer ces dernières. Notons de plus, que la majoration  
26 des effets de l'âge par les dispositifs RV suggère que les tests classiques sous-estiment les  
27 répercussions dysexecutives des âgés dans la vie réelle.

28 **Vieillesse pathologique** : Les troubles du fonctionnement exécutif font partie du tableau  
29 clinique de la DTA (Parasuraman & Nestor, 1991), et concerneraient : l'inhibition (Amieva et  
30 al., 2004 ; Colette et al., 2007 ; voir Fournet et al., 2007 pour revue), la planification (Rainville  
31 et al., 2002 ; Franchesi et al., 2007 ; Woo et al., 2010), et la flexibilité (Grady et al. , 1988). Ces  
32 altérations sont également retrouvées lors de situations de testing plus écologiques comme les  
33 tâches de navigation dans un labyrinthe (Grosse et al. 1991) ou des tâches de conduites  
34 automobile réelles (Grace et al., 2005). Cette symptomatologie exécutive se manifeste dès les  
35 premiers stades de la maladie. Ainsi, peut-on, par exemple observer de moindres performances  
36 exécutives chez les personnes DTA au stade léger comparées aux âgés contrôles (Laflèche et  
37 Albert, 1995 ; Reid et al., 1996). Selon Woo et al., (2010) l'hypométabolisme des régions  
38 préfrontales -mais aussi pariétales et occipitales- expliquerait la détérioration précoce des  
39 fonctions exécutives dans cette démence.

40 Dans une perspective d'évaluation écologique en RV, Hofmann et al. (2003), ont utilisé la  
41 tâche de commission simulée dans une rue commerçante virtuelle et rapportent que comparés  
42 aux sujets âgés contrôles, les patients DTA présentent un allongement du temps de la  
43 réalisation de la tâche ainsi que des oublis et persévérations lors de la première exposition à la  
44 tâche. De plus cet allongement du temps de réalisation est fortement corrélé à l'indicateur de  
45 vitesse de traitement du Trial Making test. L'activité de commissions a également été  
46 interrogée par Werner et al. (2008) dans un supermarché virtuel. Ces auteurs ont pu mettre en  
47 évidence l'efficacité du dispositif RV d'évaluation des fonctions exécutives pour discriminer  
48 les patients MCI des contrôles. Les patients MCI mettaient plus de temps que les contrôles, à  
49 faire les courses, prenaient de plus longues pauses et leur trajet était plus long en terme de

1 distance parcourue. Ces résultats confortent la valeur clinique des IADL dont la mesure permet  
2 de dépister des troubles cognitifs mêmes légers avant l'installation d'une démence.

3 A sévérité égale entre la DTA et la MP, l'atteinte des fonctions exécutives est généralement  
4 plus importante dans la MP (Litvan et al., 1991) et constitue souvent un signe inaugural de cette  
5 démence (Owen et al., 1992 ; Cronin-Golomb, et al. 1994 ; Altgassen et al., 2007 ; Levy et al.,  
6 2002). C'est en effet, l'atteinte précoce du circuit fronto-striatal (Lewis et al., 2003 ; Lozza et  
7 al., 2004 ; Dirnberger, et al. 2005) qui est identifié comme responsable de ces troubles  
8 dysexécutifs. Le rôle de ces déficits dans les AVQ a été étudié à l'aide d'une tâche simulée de  
9 commission dans un supermarché virtuel. Les patients MP parvenaient à réussir l'activité sans  
10 commettre plus d'erreurs que les personnes âgées contrôles mais présentaient en revanche un  
11 ralentissement dans l'exécution de la tâche et de nombreuses hésitations pour atteindre les  
12 produits, révélant un trouble dysexécutif sélectif de planification (Klinger et al., 2006). Ces  
13 effets de la MP sont également observés dans l'étude de Messier et al. (2007) où les  
14 performances d'apprentissage détériorées des patients sont majorées avec l'augmentation de la  
15 demande de coordination sensori-motrice lors de la tâche.

16 En 2002, Albani et al. simulent quant à eux, avec une autre application RV les activités de  
17 préparation d'un repas et de toilette. Les difficultés des patients MP pour ces activités reflètent  
18 leurs difficultés à planifier et ordonner correctement des séquences motrices nécessaires à la  
19 réalisation d'activités complexes. Stolwyk (2006) ont étudié la situation de conduite (avec ou  
20 sans tâche distractive) en RV chez un groupe de patients MP et d'âgés contrôles. Un effet  
21 négatif de la tâche distractive est rapporté pour les deux groupes de sujets. Par ailleurs, les  
22 performances de conduites en termes de mesures de freinage, de décélération, ou de temps de  
23 réaction étaient complètement effondrées chez les patients MP comparés aux sujets contrôles.  
24 Ainsi, l'atteinte des fonctions exécutives (flexibilité et inhibition en particulier) est capable  
25 d'interférer et perturber la réalisation de la tâche de conduite où pourtant la coordination visuo-  
26 motrice relève en partie de processus automatiques chez les conducteurs expérimentés. Les  
27 déficits observés chez les patients suggèrent que : soit, conscients de leur handicap, ils  
28 conduisent plus prudemment, donc de manière moins procédurale, et se retrouvent en situation  
29 de double tâche les empêchant d'allouer les ressources de traitement de manière appropriée à  
30 chacune des deux tâches (Scally et al., 2011 ; Stolwyk et al., 2005), soit que le niveau  
31 d'automatisme de la conduite est bien maintenue mais quand l'attention est focalisée sur la  
32 tâche concurrente, leur manque de flexibilité les empêche de passer de la tâche concurrente  
33 vers la conduite (et inversement, et ce autant de fois qu'il est nécessaire de le faire), expliquant  
34 alors les erreurs de conduites (Uc et al., 2006).

35 Dans tous les cas, les études en RV rapportent une majoration du déclin exécutif associé au  
36 vieillissement normal et pathologique soulignant que les évaluations classiques ne permettent  
37 pas de prendre la pleine mesure de ces difficultés dans le quotidien des personnes. Les  
38 applications RV permettent d'étudier l'orchestration complexe des fonctions exécutives telles  
39 qu'elles se déploient au quotidien. Une telle démarche assure en retour, une meilleure  
40 compréhension du déclin exécutif dans le vieillissement, la DTA et la MP en termes de  
41 répercussions ou incapacités fonctionnelles.

## 50 CONCLUSION

51 L'émergence des applications neuropsychologiques de la RV a permis comme nous venons de  
52 le voir, d'enrichir l'étude du vieillissement cognitif d'une approche plus écologique posant la  
53 question des différences entre cognition évaluée en laboratoire et cognition quotidienne. En  
54 effet, la RV permet de dépasser les limites présentées par les tests neuropsychologiques  
55 traditionnels et les questionnaires d'auto-évaluation des difficultés cognitives, en combinant les  
56 qualités psychométriques des premiers avec la validité écologique des seconds.

1 La revue de la littérature indique premièrement que les applications de RV permettent dans  
2 l'ensemble de reproduire les patterns de performances associés au vieillissement normal et  
3 pathologique. Lorsque les résultats divergent, il semblerait que les mesures écologiques  
4 fournies par la RV tentent toujours à majorer les troubles par rapport au testing traditionnel.

5 Ainsi, lors de situations dynamiques, plus proches du quotidien, les personnes âgées  
6 manifestent plus de difficultés que lors d'évaluation papier-crayon indiquant que ces derniers  
7 minimisent les difficultés rencontrées réellement dans la vie courante. Cette interprétation est  
8 cohérente avec plusieurs études rapportant des corrélations significatives entre les difficultés  
9 cognitives au quotidien rapportées par les sujets et la RV (contrairement aux évaluations  
10 classiques) (eg. Plancher et al. 2012). Ceci, explique probablement que les mesures en RV  
11 proches du handicap réel soient sensibles à la détection d'une démence et puissent différencier  
12 les populations saines des populations pathologiques (eg. Widman et al., 2010 ; Severson et al.,  
13 2007 ; Cushman et al. 2008). Pris ensemble, ces résultats attestent du statut de *la cognition*  
14 *quotidienne* comme champ de recherche à part entière où la RV, comme outil d'investigation,  
15 tiendra une place critique par le contrôle expérimental et la fiabilité des observations qu'elle  
16 permet. Les études à venir revisiteront certainement, sous une perspective située, les données et  
17 faits expérimentaux acquis en laboratoire concernant le vieillissement normal et pathologique.  
18 Cette perspective est d'autant plus prometteuse qu'il est aujourd'hui possible de coupler la RV  
19 avec les techniques d'imagerie (Graham et al. 2003 ; Baumann et al. 2003). Ce couplage  
20 permet déjà aujourd'hui de repenser la contribution des territoires cérébraux durant les activités  
21 cognitives. A titre d'exemple, certaines activités complexes comme la navigation ne pouvaient  
22 pas, jusque là, être étudiées à la lumière de l'imagerie car les équipements lourds et non  
23 mobiles ne sont pas compatibles avec cette activité complexe et nécessairement en mouvement  
24 dans de grands espaces (eg. Burgess et al., 2001, King et al., 2005). Aujourd'hui, la RV offre  
25 de nouvelles possibilités à ce champ d'étude (Andreano et al., 2009 ; Baumann et al., 2003 ;  
26 Carvalho et al. 2006 ; Di Bono & Zorzi, 2008 ; Diekmann, et al. 2007 ; Kim et al., 2009 ;  
27 Maguire, et al. 1999). A cela, dans une perspective de recherches plus cliniques, il est  
28 envisageable que des marqueurs neurocomportementaux de la cognition quotidienne puissent  
29 être un élément contributif au diagnostic différentiel des démences au même titre que les  
30 examens cliniques d'usage (imagerie, évaluations neuropsychologiques d'usage ainsi que les  
31 dosages de marqueurs biologiques de certaines pathologies, ANAES, 2000).

32 Toutefois, les développements futurs devront tenir compte des limites soulevées par cette  
33 revue. Par exemple, la plupart des études ayant optées pour une grande validité écologique au  
34 détriment de la spécificité des mesures échouent à démontrer leur capacité à identifier le ou les  
35 mécanismes cognitifs sous-tendant les différences entre les groupes (eg., Hoffman et al., 2003  
36 ou Werner et al., 2008). Disposer de mesures fines des processus en jeu lors d'une tâche est une  
37 garantie de progrès dans la compréhension des mécanismes de la cognition quotidienne  
38 (McGee et al., 2000 ; Schultheis et al., 2002; N'Kaoua & Sauzéon, 2008). De la même manière,  
39 l'étude des liens entre performance en RV, scores aux échelles du handicap, et mesures de  
40 sévérité des troubles cognitifs (e.g., MMSE, CVLT, TMT...), n'est pas réalisée de manière  
41 systématique rendant la valeur ajoutée de ces nouveaux outils quelque peu opaque.

42 Enfin, dans une perspective d'application clinique, un des enjeux des outils futurs (d'évaluation  
43 ou de remédiation) concerne la portabilité de ces derniers. Il s'agit de favoriser le  
44 développement d'outils minimalistes, portables et faciles d'utilisation par les cliniciens. Pour ce  
45 faire, dès aujourd'hui les études de validation doivent s'inscrire dans ce type d'équipements  
46 afin de raccourcir des délais entre les phases de recherche/validation et de mise en service. Il  
47 apparaît indispensable que les recherches s'appuient sur des systèmes RV dont le format est à  
48 un niveau « pré-industriel » avec une attention particulière sur la portée des IHM utilisées qui  
49 sont loin d'être sans effet sur les traitements cognitifs et sensorimoteurs réalisés par les sujets  
50 (eg. Larrue et al. 2009 ; Ruddle & Lessels, 2009 ; Cockburn & McKenzie, 2004).

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

- 1 • Adamovich, S.V., Berkinblit, M.B., Hening, W., Sage, J., Poizner, H. (2001). The interaction of visual and  
2 proprioceptive inputs in pointing to actual and remembered targets in Parkinson's disease.  
3 *Neuroscience* 104 (4), pp. 1027-1041.
- 4 • Agence Nationale d'Accréditation et d'Évaluation en Santé. Recommandations pratiques pour le diagnostic de  
5 la maladie d'alzheimer. Service des recommandations et références professionnelles,  
6 <http://www.anaes.fr> ou <http://www.sante.fr>, 2000.
- 7 • Albani, G., Pignatti, R., Bertella, L.; Priano, L., Semenza, C., Molinari, E., Riva, G., Mauro, Common daily  
8 activities in the virtual environment: A preliminary study in parkinsonian patients. *Neurological*  
9 *Sciences*, 2002, 23(2), 49-50.
- 10 • Algase, D. L., Beattie, E. R. A., Song, J. -A., Milke, D., Duffield, C., Cowan, B. (2004). Validation of the  
11 Algase Wandering Scale (Version 2) in a cross cultural sample. *Aging and Mental Health*, 8 (2), pp.  
12 133-142.
- 13 • Algase, D., Son, G.R, Beel-Bates, C., Song, J., Tao, L., Beattie., E.,Leitsch, S., \_2007). Initial psychométric  
14 evaluation of the wayfinding effectiveness scale. *Western Journal of nursring research*, 29(8), 1015-  
15 1032.
- 16 • Allen, G.L., Kirasic, K.C., Rashotte, M.A., Haun, D.B.M. (2004). Aging and path integration skill: Kinesthetic  
17 and vestibular contributions to wayfinding. *Perception and Psychophysics*, 66 (1), pp. 170-179.
- 18 • Altgassen, M., Phillips, L.,Kopp, U., Kliegel, M. (2007). Role of working memory components in planning  
19 performance of individuals with Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 45 (10), pp. 2393-2397.
- 20 • American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, fourth ed. DSM-IV*.  
21 American Psychiatric Association, Washington, DC, 1994.
- 22 • Amick, M. M., Schendan, H.E., Ganis, G., & Cronin-Golomb, A. (2006). Frontostriatal circuits are necessary  
23 for visuomotor transformation: Mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 44 (3), 339-  
24 349.
- 25 • Amieva, H., Phillips, L. H., Della Sala, S., Henry, J. D. (2004). Inhibitory functioning in Alzheimer's disease.  
26 *Brain*, 127, pp. 949-964.
- 27 • Andreano, J., Liang, K.,Kong, L., Hubbard, D.,Wiederhold, B.K.,Wiederhold, M.D. (2009). Auditory cues  
28 increase the hippocampal response to unimodal virtual reality. *Cyberpsychology & behavior : the*  
29 *impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 12 (3), pp. 309-313
- 30 • Andrés, P., & Van der Linden, M. (2000). Age related differences in Supervisory Attentional System  
31 functions. *Journal of Gerontology : Psychological Sciences*, 35, pp. 373-380.
- 32 • Andrés, P., Parmentier, F.B.R., Escera, C. (2006). The effect of age on involuntary capture of attention by  
33 irrelevant sounds: A test of the frontal hypothesis of aging. *Neuropsychologia* 44 (12), pp. 2564-2568.
- 34 • Antonova, E., Parslow, D., Brammer, M., Dawson, G. R., Jackson, S. H. D., & Morris, R. G. (2009). Age-  
35 related neural activity during allocentric spatial memory. *Memory*, 17 (2), pp. 125-143.
- 36 • Arbuckle, T.Y., Cooney, R.,Milne, J., Melchior, A. (1994). Memory for spatial layouts in relation to age and  
37 schema typicality. *Psychology and Aging* 9 (3), pp. 467-480
- 38 • Armstrong, C. L., & Cloud, B. (1998). The emergence of spatial rotation deficits in dementia and normal  
39 aging. *Neuropsychology*, 12 (2), pp. 208-217
- 40 • Arns, L.L., Cerney, M.M. The Relationship Between Age and Incidence of Cybersickness among Immersive  
41 Environment Users. *Proceedings of the 2005 IEEE Conference 2005 on Virtual Reality*, 2005, 267-268.
- 42 • Baguena, N., Thomas-Antérion, C., Sciessere, K.,Truche, A., Extier, C., Guyot, E., Paris, N. (2006). Ecologic  
43 evaluation in the cognitive assessment of brain injury patients: generation and execution of script.  
44 *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 49 (5), pp. 234-241
- 45 • Ball, K., Owsley, C., Sloane M. E., Roenker, D. L., Bruni, J., R. (1993). Visual attention problems as a  
46 predictor of vehicle crashes in older drivers. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 34, pp.  
47 3110-3112.
- 48 • Ballard C. G., Mohan R. N., Handy C. B. , & Patel A. (1991). Wandering in dementia sufferers. *International*  
49 *Journal of Geriatric Psychiatry*, 6 (8), pp. 611-614.
- 50 • Barberger-Gateau, P., Fabrigoule, C., Helmer, C., Rouch, I., Dartigues, J.F. Functional impairment in  
51 instrumental activities of daily living: An early clinical sign of dementia? *Journal of the American*  
52 *Geriatrics Society*, 1999, 47(4), 456-462
- 53 • Barberger-Gateau, P., Letenneur, L., Pérès, K. Résultats Paquid, from [http://www.isped.ubordeaux2.](http://www.isped.ubordeaux2.fr)  
54 [fr](http://www.isped.ubordeaux2.fr) RECHERCHE\_paquid\_2004\_Resultats\_PAQUID, 2004.
- 55 • Barrash J. (1994). Age-related decline in route learning ability. *Developmental Neuropsychology*, 10, pp.189-  
56 201
- 57 • Baumann, S., Neff, C., Fetzick, S., Stangl, G., Basler, L., Vereneck, R., Schneider, W. A Virtual Reality  
58 System for Neurobehavioral and Functional MRI Studies *CyberPsychology & Behavior*, 2003, 6(3),  
59 259-266.

- 1 • Berardi, A., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2001). Overall vigilance and sustained attention decrements in  
2 healthy aging. *Experimental Aging Research*, 27, pp. 19 – 39.
- 3 • Bernard, F. A., Desgranges, B., Eustache, F. & Baron, J. C. (2007). Neural correlates of age-related verbal  
4 episodic memory decline: A pet study with combined subtraction/correlation analysis. *Neurobiology of  
5 aging*, 28, pp. 1568-1576.
- 6 • Bertoli, S., Smurzynski, J., Probst, R. (2002). Temporal resolution in young and elderly subjects as measured  
7 by mismatch negativity and a psychoacoustic gap detection task. *Clinical Neurophysiology* 113 (3), pp.  
8 396-406.
- 9 • Bieliauskas, L. A. (2005). Neuropsychological assessment of geriatric driving competence. *Brain Injury*, 19,  
10 pp. 221–226.
- 11 • Blackman, T., van Schaik, P., Martyr, A. (2007). Outdoor environments for people with dementia: An  
12 exploratory study using virtual reality. *Ageing and Society*, 27 (6), pp. 811-825.
- 13 • Blennow, K., de Leon, M.J., & Zetterberg, H. (2006). *Alzheimer's disease.* *Lancet*, 368 (9533), pp. 387-403.
- 14 • Bowman, D., Gabbard., J. Hix, D. A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification  
15 and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1996, 11(4), 404-424.
- 16 • Bronnick, K., Ehrt, U., Emre, M., De Deyn, P.P., Wesnes, K., Tekin, S., Aarsland, D. (2006). Attentional deficits  
17 affect activities of daily living in dementia-associated with Parkinson's disease. *Journal of Neurology,  
18 Neurosurgery and Psychiatry* 77 (10), pp. 1136-1142.
- 19 • Brooks, B.M., Rose, F.D., Attree, E.A., Elliot-Square, A. (2002). An evaluation of the efficacy of training  
20 people with learning disabilities in a virtual environment. *Disability and rehabilitation*, 24(11-12), 622-  
21 626.
- 22 • Brooks, B.M., McNeil, J.E., Rose, F.D., Greenwood, R.J., Attree, E.A., Leadbetter, A.G. (1999). Route  
23 learning in a case of amnesia: A preliminary investigation into the efficacy of training in a virtual  
24 environment. *Neuropsychological Rehabilitation* 9 (1), pp. 63-76.
- 25 • Bruce, P. R., & Herman, J. F. (1983). Spatial knowledge of young and elderly adults: scene recognition from  
26 familiar and novel perspectives. *Experimental Aging Research*, 9, pp. 169-173.
- 27 • Buracchio, T., Kaye, J. Early Diagnosis of Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment: Imaging,  
28 Biomarkers, and Technology. *Journal of the American Society on Aging*, 2009, 33(1), 18-23.
- 29 • Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, pp.  
30 77-97.
- 31 • Burgess, N., Trinkler, I., King, J., Kennedy, A., Cipolotti, L. (2006). Impaired Allocentric spatial memory  
32 underlying topographical disorientation. *Reviews in the neurosciences*, 17, 239-251.
- 33 • Burgess, P.W., Quayle, A., & Frith, C. D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined  
34 by positron emission tomography. *Neuropsychologia*, 39, 545–555.
- 35 • Castilla-Rilo, J. Lopez-Arrieta, J. Bermejo-Pareja, F., Ruiz, M., Sanchez-Sanchez, F. Trincado, R. Instrumental  
36 activities of daily living in the screening of dementia in population studies: a systematic review and  
37 meta analysis. *International journal of geriatric psychiatry*, 2007, 22, 829-836.
- 38 • Chao, L. L. & Knight, R., T. (1997). Prefrontal Deficits in Attention and Inhibitory Control with Aging.  
39 *Cerebral Cortex*, 7, pp. 63-69.
- 40 • Charness, N. Aging and Human Performance. *Human factors*, 2008, 50(3), 548-555.
- 41 • Cherrier, M. M., Mendez, M., & Perryman, K. (2001). Route learning performance in Alzheimer disease  
42 patients. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 14 (3), pp. 159-168.
- 43 • Chevignard, M., Taillefer, C., Picq, C., Poncet, F., Pradat-Diehl, P., (2006). Évaluation du syndrome  
44 dysexécutif en vie quotidienne, In Pradat-Diehl, P., Peskine, A. (Eds) Évaluation des troubles  
45 Neuropsychologiques en vie quotidienne. Springer-Verlag France, Paris, 2006
- 46 • Chiu, Y. -C., Algase, D., Liang, J., Liu, H. -C., & Lin, K. -N. (2005). Conceptualization and measurement of  
47 getting lost behavior in persons with early dementia. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 20  
48 (8), pp. 760-768.
- 49 • Christiansen, C., Abreu, B., Ottenbacher, K., Huffman, K., Masel, B., & Culpepper, R. (1998). Task perform-  
50 ance in virtual environments used for cognitive reha- bilitation after traumatic brain injury. *Archives of  
51 Physical Medicine and Rehabilitation*, 79, 888–892.
- 52 • Cockburn, A., McKenzie, B. Evaluating spatial memory in two and three dimensions. *Int. J. Human-Computer  
53 Studies*, 2004, 61, 359–373
- 54 • Collette, F., Amieva, H., Adam, S., Hogge, M., Van der Linden, M., Fabrigoule, C., Salmon, E. (2007).  
55 Comparison of inhibitory functioning in mild Alzheimer's disease and frontotemporal dementia. *Cortex*,  
56 43, pp. 866–874.
- 57 • Cox, D.J., Quillian, W.C., Thorndike, F.P., Kovatchev, B.P., Hanna, G. (1998). Evaluating driving performance  
58 of outpatients with Alzheimer disease. *Journal of the American Board of Family Practice* 11 (4), pp.  
59 264-271.



- 1 • Craik, F.I.M., & Bialystock, E. (2006). Planning and task management in older adults:cooking breakfast.  
Memory & Cognition, 34 (6), 1236-1249.
- 2 • Cronin-Golomb, A. & Amick, M. (2001). Spatial abilities in aging, Alzheimer’s disease, and Parkinson’s  
3 disease. *In F.Boller and S.F. Cappa (Eds.): Handbook of neuropsychology, (pp. 119-143).*
- 4 • Cronin-Golomb, A., Corkin, S., Growdon, J. H. (1994). Impaired problem solving in Parkinson's disease:  
5 Impact of a set-shifting deficit. *Neuropsychologia, 32 (5), pp. 579-593.*
- 6 • Cronin-Golomb, A., & Braun, A. E. (1997). Visuospatial dysfunction and problem solving in Parkinson's  
7 disease. *Neuropsychology, 11 (1), 44-52.*
- 8 • Crook, T.H., Younjohn, J.R., Larrabee, G.J. (1990) The misplaced objects test: A measure of everyday visual  
9 memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 12(6), 819-833.*
- 10 • Cushman, L., Stein, K., Duffy, C.J. Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease  
11 using virtual reality. *Neurology, 2008, 71, 888-895.*
- 12 • Czaja SJ, Charness N, Fisk AD, Hertzog C, Nair SN, Rogers WA, Sharit J. Factors predicting the use of  
13 technology: findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology  
14 Enhancement (CREATE). *Psychol Aging 2006;21:333–52.*
- 15 • Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A.D., Hertzog, C., Nair, S.N., Rogers, W.A., Sharit, J. Factors predicting the  
16 use of technology: Findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology  
17 Enhancement (CREATE). *Psychology and Aging, 2006, 21, 333–352.*
- 18 • Daigneault, S., Braun, C. M. J., & Whitaker, H. A. (1992). Early effects of normal aging on perseverative and  
19 non-perseverative prefrontal measures. *Developmental Neuropsychology, 8, pp. 99-114.*
- 20 • Davidson, S., Wagenaar, R., Young, D., & Cronin-Golomb, A. (2008). Impact of optic flow perception and  
21 egocentric coordinates on veering in Parkinson's disease. *Brain, 131 (11), pp. 2882-2893.*
- 22 • Davidson, S., Cronin-Golomb, A., & Lee, A. (2005). Visual and spatial symptoms in Parkinson's disease.  
23 *Vision Research, 45 (10), pp. 1285-1296.*
- 24 • De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gardini, S. (2006). The role of mental rotation and age in spatial perspective-  
25 taking tasks: When age does not impair perspective-taking performance. *Applied Cognitive Psychology,*  
26 *20 (6), pp. 807-821.*
- 27 • DeCarli, C., Massaro, J., Harvey, D., Hald, J., Tullberg, M., Au, R., Beiser, A., D’agostino, R., Wolf, P.A.  
28 (2005): Measures of brain morphology and infarction in the framingham heart study: establishing what  
29 is normal. *Neurobiology of Aging 26:491–510.*
- 30 • DeIpoli, A. R., Rankin, K. P., Mucke, L., Miller, B. L., Gorno-Tempini, M. L. (2007). Spatial cognition and  
31 the human navigation network in AD and MCI. *Neurology, 69, pp. 986-997.*
- 32 • Déjos, M., Sauzéon, H., N’Kaoua, B. (2012). La réalité virtuelle au service de l’évaluation clinique de la  
33 personne âgée : le de’pistage précoce de la démence. *Revue neurologique, 168, 404-414.*
- 34 • Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E. Ober, B.A. *CVLT California Verbal Learning Test : adult*  
35 *version.Manual.* Toronto : The Psychological Corporation. Harcourt Jovandvich, 1987.
- 36 • Derouesné C, Guigot J. A caregiver form of the —Cognitive Difficulties ScaleI for assessment of functional  
37 impairment in daily life in Alzheimer’s disease. In: Bergener M, Finkel SI, eds.Treating Alzheimer’s  
38 disease and other dementias. New York: Springer Publishing Co, 1995, 318-28.
- 39 • Derouesné, C. (2005). Signification de la plainte mnésique – ou de quoi se plaint-on lorsqu’on se pplaint de la  
40 mémoire ? *Neurologie - Psychiatrie – Gériatrie 25, pp. 14-18.*
- 41 • Di Bono, M.G., Zorzi, M. (2008). Decoding Cognitive States from fMRI Data Using Support Vector  
42 Regression. *PsychNology Journal, 6(2), 189-201.*
- 43 • Diekmann, V., Jürgens, R., Becker, W. (2009). Deriving angular displacement from optic flow: A fMRI study.  
44 *Experimental Brain Research, 195 (1), pp. 101-116.*
- 45 • Dirnberger, G., Frith, C. D., Jahanshahi, M. (2005). Executive dysfunction in Parkinson’s disease is associated  
46 with altered pallidal–frontal processing. *NeuroImage, 25, 588-599.*
- 47 • Doeller, C. F., King, J. A., & Burgess, N. (2008). Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and  
48 boundaries in spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*  
49 *America, 105 (15), pp. 5915-5920.*
- 50 • Dollinger, S. M. C. (1995). Mental rotation performance: age, sex, and visual field differences. *Developmental*  
51 *Neuropsychology, 11, pp. 215–222.*
- 52 • Drachman, D. A., and Swearer, J. M. (1993). Driving and Alzheimer’s Disease: The risk of crashes.  
53 *Neurology, 43, pp. 2448-2456.*
- 54 • Driscoll, I., Hamilton D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in  
55 humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior, 47 (3), pp.*  
56 *326-335.*

- 1 • Driscoll, I., Hamilton, D. A., Petropoulos, H., Yeo, R. A., Brooks, W. M., Baumgartner, R. N., & Sutherland,  
2 R. J. (2003). The ageing hippocampus: Cognitive, biochemical and structural findings. *Cerebral Cortex*,  
3 13, pp. 1344-1351.
- 4 • Drzezga, A., Grimmer, T., Peller, M., Wermke, M., Siebner, H., Rauschecker, J. P., et al. (2005). Impaired  
5 cross-modal inhibition in Alzheimer dis- ease. *PLoS Medicine*, 2, e288.
- 6 • Duchek JM, Hunt L, Ball K, et al. 1998. Attention and driving performance in Alzheimer’s disease. *J Gerontol*  
7 *BPsychol Sci Soc Sci* 53: 130–141.
- 8 • Elderkin-Thompson, V., Ballmaier, M., Helleman, G., Pham, D., & Kumar, A. (2008). Executive function  
9 and MRI prefrontal volumes among healthy older adults. *Neuropsychology*, 22, pp. 626-637.
- 10 • Elkind JS, Rubin E, Rosenthal S, Skoff B, Prather P. A simulated reality scenario compared with the com-  
11 puterized Wisconsin Card Sorting Test: an analysis of preliminary results. *CyberPsychology &*  
12 *Behavior* 2001; 4:489–96.
- 13 • Fitten LJ, Perryman KM, Wilkinson CJ, et al. 1995. Alzheimer and vascular dementias and driving. A  
14 prospective road and labora- tory study. *JAMA* 273: 1360–1365.
- 15 • Flynn D, Van Schaik MP, Blackman T, Femcott C, Hobbs B, Calderon C. Developing a virtual reality–based  
16 methodology for people with dementia: a feasibility study. *Cyberpsychol Behav* 2003;6(6):591–611.
- 17 • Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R. Minimal state. A practical method for grading the cognitive  
18 state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 1975, 189-98.
- 19 • Foreman, N., Stanton-Fraser, D., Wilson, P. N., Duffy, H., & Parnell, R. (2005). Transfer of spatial knowledge  
20 to a two-level shopping mall in older people, following virtual exploration. *Environment and Behavior*,  
21 37 (2), pp. 275-292.
- 22 • Fournet, N., Mosca, C., Moreaud, O. (2007). Deficits in inhibitory processes in normal aging and patients with  
23 Alzheimer's disease: A review | [Déficits des processus inhibiteurs dans le vieillissement normal et la  
24 maladie d'Alzheimer]. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillissement* 5 (4), pp. 281-294.
- 25 • Franceschi, M., Caffarra, P., De Vreese, L., Pelati, O., Pradelli, S., Savare, R., Cerutti, R., & Grossi, E. (2007).  
26 Visuospatial planning and problem solving in Alzheimer’s disease patients: a study with the Tower of  
27 London test. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 24, pp. 424-428.
- 28 • Frittelli, C., Borghetti, D., Iudice, G., Bonanni, E., Maestri, M., Tognoni, G., Pasquali, L., Iudice, A. (2009).  
29 Effects of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment on driving ability: A controlled clinical  
30 study by simulated driving test. *International Journal of Geriatric Psychiatry* 24 (3), pp. 232-238.
- 31 • Fuchs P, Moreau G, Berthoz A, Vercher JL. *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1 L'homme et*  
32 *l'environnement virtuel*. Paris : Presses de l’Ecole des Mines de Paris, 2006.
- 33 • Gershberg, F. B., Shimamura, A. P. (1995). The role of the frontal lobes in the use of organizational strategies  
34 in free recall. *Neuropsychologia*, 13, 1305-1333.
- 35 • Grady, C. L., Haxby, J. V., Horwitz, B., Sundaram, M., Berg, G., Schapiro, M., Friedland, R.P., Rapoport, S.I.  
36 (1988). Longitudinal study of the early neuropsychological and cerebral metabolic changes in dementia  
37 of the Alzheimer type. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 10 (5), pp. 576-596.
- 38 • Graham, S. J., Quintin, G., Mraz, R., Hong, J., & Zakzanis, K. K. (2003). Combining virtual reality  
39 experiments with functional magnetic resonance imaging: Initial work assessing human spatial  
40 navigation. In B. K. Wiederhold, S. Bouchard & G. Riva (Eds.): *Annual review of cybertherapy and*  
41 *telemedicine*, (pp. 83-96). Interactive Media Institute, San Diego.
- 42 • Greenwood, P. M. & Parasuraman, R. (1999). Scale of attentional focus in visual search. *Perception &*  
43 *Psychophysics*, 61 (5), pp. 837-859.
- 44 • Grober, E., Buschke, H. Genuine memory deficits in dementia. *Developmental Neuropsychology*, 1987, 3, 13-  
45 36.
- 46 • Gronwall, D. M. A. (1977). Paced auditory serial-addition task: a measure of recovery from concussion.  
47 *Perceptual and Motor Skills*, 44, pp. 367-73.
- 48 • Grosse, D.A., Wilson, R.S., & Fox, J.H. (1991). Maze learning in Alzheimer’s disease. *Brain and Cogni- tion*,  
49 15,1–9.
- 50 • Guimond, A., Braun, C., Rouleau, I., Bélanger, F., Godbout, L. (2006). Remembering the past and foreseeing  
51 the future while dealing with the present: A comparison of young adult and elderly cohorts on a  
52 multitask simulation of occupational activities. *Experimental Aging Research*, 32 (3), pp. 363-380.
- 53 • Gunning-Dixon, F. M. & Raz, N. (2003). Neuroanatomical correlates of selected executive functions in  
54 middle-aged and older adults: A prospective MRI study. *Neuropsychologia*, 41, pp. 1929-1941.
- 55 • Hamilton, A. C., & Martin, R. C. (2005). Dissociations among tasks involving inhibition: A single-case study.  
56 *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5, 1-13.
- 57 • Hawthorn, D. Possible implications of ageing for interface designers. *Interacting with Computers*, 2000, 12,  
58 507-528.
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65

- 1 • 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.
- 2 • Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*,  
3 209 (1), pp. 49-58.
- 4 • Head, D., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Raz, N. (2008). Neuroanatomical and cognitive mediators of  
5 age-related differences in episodic memory. *Neuropsychology*, 22, pp. 491-507.
- 6 • Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. G., Curtiss, G. (1993). Wisconsin Card Sorting Test  
7 Manual. Odessa (FL): Psychological Assessment Resources.
- 8 • Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Shah, & A. Miyake (Eds.):  
9 The Cambridge handbook of visuospatial thinking, (pp. 121-169). Cambridge, UK; New York, NY:  
10 Cambridge University Press.
- 11 • Hegarty, M., Montello, D.R., Richardson, A.E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at  
12 different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning.  
13 Intelligence, 34 (2), pp. 151-176.
- 14 • Helmstaedter C, Hauff M, Elger CE (1998) Ecological validity of list-learning tests and self-reported memory  
15 in healthy individuals and those with temporal lobe epilepsy. *J Clin Exp Neuropsychol* 20 (3): 365-75.
- 16 • Henderson, V. W., Mack, W., & Williams, B. W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease.  
17 *Archives of Neurology*, 46, pp. 391-394.
- 18 • Henry, J. D., & Phillips, L. H. (2006). Covariates of production and perseveration on tests of phonemic,  
19 semantic and alternating fluency in normal aging. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 13, 1–23.
- 20 • Henry, J. D., MacLeod, M. S., Phillips, L. H., & Crawford, J. R. (2004). A meta-analytic review of prospective  
21 memory and aging. *Psychology and Aging*, 19, 27–39. DOI: 10.1037/0882-7974.19.1.27.
- 22 • Hillyard, S. A., Annlo-Vento, L. (1998). Event-related potentials in the study of visual selective attention.  
23 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (3), pp. 781-787.
- 24 • Hoehn, M. M. & Yahr, M. D. (1967). Parkinsonism: onset, progression and mortality. *Neurology*, 17, pp. 427-  
25 442.
- 26 • Hoffman, L., McDowd, J. M., Atchley, P., & Dubinsky, R. (2005). The role of visual attention in predicting  
27 driving impairment in older adults. *Psychology and Aging*, 20 (4), pp. 610-622.
- 28 • Hofmann M, Rösler A, Schwarz W, Müller-Spahn F, Kräuchi K, Hock C, et al. Interactive computer-  
29 training as a therapeutic tool in Alzheimer's disease. *Comp Psychiatry* 2003;44(3): 213–9.
- 30 • Hofmann M, Rösler A, Schwarz W, Müller-Spahn F, Kräuchi K, Hock C, Seifritz E. Interactive computer-  
31 training as a therapeutic tool in Alzheimer's disease. *Comprehensive Psychiatry*, 2003, 44(3), 213-219
- 32 • Hort, J., Laczó, J., Vyhánek, M., Bojar, M., Bureš, J., & Vlček, K. (2007). Spatial navigation deficit in  
33 amnesic mild cognitive impairment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*  
34 *States of America*, 104 (10), pp. 4042-4047.
- 35 • Iaria, G., Palermo, L., Comitteri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of  
36 cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196, 187–191.
- 37 • Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive strategies dependent on the  
38 hippocampus and caudate nucleus in human navigation: Variability and change with practice. *Journal*  
39 *of Neuroscience*, 23 (13), pp. 5945-5952.
- 40 • Inagaki, H., Meguro, K., Shimada, M., Ishizaki, J., Okuzumi, H., & Yamadori, A. (2002). Discrepancy  
41 between mental rotation and perspective-taking abilities in normal aging assessed by Piaget's Three-  
42 Mountain Task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24 (1), pp. 18-25.
- 43 • Jones, T. C. & Jacoby, L. L. (2005). Conjunction errors in recognition memory: Modality-free errors for older  
44 adults but not for young adults. *Acta Psychologica*, 120, pp. 55-73.
- 45 • Kalia, A. A., Legge, G. E., & Giudice, N. A. (2008). Learning building layouts with non-geometric visual  
46 information: The effects of visual impairment and age. *Perception*, 37 (11), pp. 1677-1699
- 47 • Kalova E, Vlcek K, Jarolimova E, Bures J: Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired  
48 in early stages of Alzheimer's disease: corresponding results in real space tests and computer tests.  
49 *Behav Brain Res* 2005;159:175- 186.
- 50 • Kaskie, B., & Storandt, M. (1995). Visuospatial deficit in dementia of the Alzheimer type. *Archives of*  
51 *Neurology*, 52 (4), pp. 422-425.
- 52 • Kavcic, V., Fernandez, R., Logan, D., & Duffy, C. J. (2006). Neurophysiological and perceptual correlates of  
53 navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain*, 129 (3), pp. 736-746.
- 54 • Kennedy RS, Lane NE, Lilienthal MG, Berbaum KS, Hettlinger LJ. Profile analysis of simulator sickness  
55 symptoms: application to virtual environment systems. *Presence Teleoperators Virtual Environ*  
56 1992;1:295–301.
- 57 • Kessels, R. P. C., Feijen, J., & Postma, A. (2005). Implicit and explicit memory for spatial information in  
58 Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 20 (2-3), pp. 184-191.

- 1 • Keszyues, T. I., Mehlitz, M., Schilken, E., Weniger, G., Wolf, S., Piccolo, U., Irle, E., Rienhoff, O. Preclinical  
2 evaluation of a virtual reality neuropsychological test system: Occurrence of side effects:  
3 *CyberPsychology & Behavior*, 2000, 3(3), 343-349.
- 4 • Kim., E., Jung, Y-C, Ku, J., Kim J-J., Lee, H., Kim, S.Y., Cho, H.S. (2009). Reduced activation in the mirror  
5 system during a virtual social cognition task in euthymic bipolar disorder. *Progress in Neuro-*  
6 *psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 33, 1409-1416.
- 7 • King JA, Hartley T, Spiers HJ, Maguire EA, Burgess N. Anterior prefrontal involvement in episodic retrieval  
8 reflects contextual interference. *Neuroimage* 2005 ; 28 : 256-67
- 9 • Kirasic, K. C. (1991). Spatial cognition and behavior in young and elderly adults: implications for learning  
10 new environments. *Psychology of Aging*, 6 (1), pp. 10-18.
- 11 • Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and  
12 wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, 2, 117-134.
- 13 • Kliegel, M., Rendell, P. G., & Altgassen, M. (2008). The added value of an applied perspective in cognitive  
14 gerontology. In S. M. Hofer, & D. F. Alwin (Eds.), *Handbook of cognitive aging: Interdisciplinary*  
15 *perspectives* (pp. 587-602). Thousand Oaks: Sage Publications.
- 16 • Klimkeit, E.I., Bradshaw, J.L., Charlton, J., Stolwyk, R., Georgiou-Karistianis, N. (2009). Driving ability in  
17 Parkinson's disease: Current status of research. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 33 (3), pp.  
18 223-231.
- 19 • Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., Marié, R.M. Virtual action in Parkinson's disease: a control study.  
20 *Cyberpsychol Behav*, 2006, 9(3), 342-347.
- 21 • Laczo, J., Andel, R., Vyhnalek, M., Vlcek, K., Magerova, H., Varjassyova, A., et al. (2010). Human analogue  
22 of the Morris Water Maze for testing subjects at risk of Alzheimer's disease. *Neurodegenerative*  
23 *Diseases*, 7, 148-152.
- 24 • Laczó, J., Vlček, K., Vyhnálek, M., Vajnerová, O., Ort, M., Holmerová, I., Tolar, M., Andel, R., Bojar, M., &  
25 Hort, J. (2009). Spatial navigation testing discriminates two types of amnesic mild cognitive  
26 impairment. *Behavioural Brain Research*, 202 (2), 252-259.
- 27 • Laczó, J., Andel, R., Vlček, K., Macoška, V., Vyhnálek, M., Tolar, M., Bojar, M., & Hort, J. (2011). Spatial  
28 Navigation and APOE in Amnesic Mild Cognitive Impairment. *Neurodegenerative Diseases*, (8), 169-  
29 177.
- 30 • Lafleche, G., Albert, M.S. (1995). Executive function deficits in mild Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 9  
31 (3), pp. 313-320.
- 32 • Larrue, F., Sauzeon, H., Gross, H., N'Kaoua, B. Comparaison d'interacteurs de navigation dans le transfert du  
33 virtuel au réel ; Joystick VS Tapis Roulant : Application à l'orientation spatiale. *Colloque de*  
34 *prospective PIRSTEC -23 octobre 2009.*
- 35 • Larson, P.A., Rizzo, A.A., Buckwalter, J.G., van Rooyen, A., Kratz, K., Neumann, U., Kesselman, C.,  
36 Thiebaut, M., & van der Zaag, C. (1999). Gender issues in the application of a virtual environment  
37 spatial rotation project. *Cyberpsychology and Behavior* 2 (2), pp. 113-123.
- 38 • Laurance, H. E., Thomas, K. G. F., Newman, M. C., Kaszniak, A. W., Nadel, L., & Jacobs, W. J. (2002).  
39 Older adults map novel environments but do not place learn: Findings from a computerized spatial task.  
40 *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 9 (2), pp. 85-97.
- 41 • Law, A. S., Logie, R. H., & Pearson, D. G. (2006). The impact of secondary tasks on multitasking in a virtual  
42 environment. *Acta Psychologica*, 122 (1), pp. 27-44.
- 43 • Lawton, M.P., & Brody, E.M. Assessment of older people: self-maintaining and instrumental activities of daily  
44 living. *Gerontologist*, 1969, 9,179-86.
- 45 • Le gall, D., Allain, P. Applications des techniques de réalité virtuelle à la neuropsychologie clinique. *Champ*  
46 *Psychosomatique*, 2001, 22, 25-38.
- 47 • Lee, A. C., Harris, J. P., & Calvert, J. E. (1998). Impairments of mental rotation in Parkinson's disease.  
48 *Neuropsychologia*, 36 (1), 109-114.
- 49 • Lee, H. C. (2006). Virtual driving tests for older adult drivers? *British Journal of Occupational Therapy*, 69  
50 (3), pp. 138-141.
- 51 • Lee, H. C., Cameron, D., & Lee, A. H. (2003). Assessing the driving performance of older adult drivers: On-  
52 road versus simulated driving. *Accident Analysis and Prevention*, 35(5), 797-803.
- 53 • Lee, J. H., Wiederhold, B. K., Wiederhold, M. D., Kim, S. I., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee,  
54 S. -M., Kang, Y., Kim, D. Y., & Yu, T. (2003). A virtual reality system for the assessment and  
55 rehabilitation of the activities of daily living. *Cyberpsychology and Behavior*, 6 (4), pp. 383-388.
- 56 • Leplow, B., Höll, D., Zeng, L., Herzog, A., Behrens, K., & Mehdorn, M. (2002). Spatial behaviour is driven by  
57 proximal cues even in mildly impaired Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 40 (8), pp. 1443-1455.

- 1 • (2002). Memory and executive function impairment predict dementia in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 17 (6), pp. 1221-1226.
- 2
- 3 • 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.
- 4
- 5
- 6 • Lezak, M. D. (2004). *Neuropsychological assessment* (4th ed.). New York: Oxford University Press.
- 7 • 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
- 8
- 9 • Lipman, P. D. (1991). Age and Exposure Differences in the Acquisition of Route Information. *Psychology and Aging*, 6, pp. 128-133.
- 10
- 11 • 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.
- 12
- 13
- 14 • 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.
- 15
- 16 • 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.
- 17
- 18 • 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.
- 19
- 20
- 21
- 22 • LoPriore, C., Castelnuovo, 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.
- 23
- 24
- 25 • \_\_\_\_\_, M., Schellenbach, M., Grossman-Hutter, B., \_\_\_\_\_ger, 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.
- 26
- 27
- 28 • 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.
- 29
- 30 • 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.
- 31
- 32
- 33 • 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.
- 34
- 35 • Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E., & Moffat, S. D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research*, 205 (1), pp. 88-95.
- 36
- 37 • Manchester, D., Priestly, N. & Jackson, H. (2004). The assessment of executive functions: Coming out of the office. *Brain Injury*, 18, pp. 1067-1081.
- 38
- 39 • 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.
- 40
- 41 • 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.
- 42
- 43
- 44 • Martin, R. (1972), *Test des commissions* (2nde édition), Editest, Bruxelles.
- 45
- 46 • 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.
- 47
- 48 • Mattis S. *Dementia rating scale professional manual*. Odessa: Psychological Assessment Resources, 1976.
- 49 • 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.
- 50
- 51 • 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
- 52
- 53 • McDowd, J. M. (1997). Inhibition in Attention and Aging. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 52B (6), pp. 265-273.
- 54
- 55 • 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.
- 56
- 57 • 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.
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65

- 1 • McShane, R., Gedling, K., Keene J., Fairburn, C., Jacoby, R., & Hope, T. (1998). Getting lost in dementia: a  
2 longitudinal study of a behavioral symptom. *International Psychogeriatrics*, 10 (3), pp. 253-260.
- 3 • Meador, K. J., Meador, A. S., Loring, D. W., Lee, G. P., Martin, R. C. (1990). Anterograde Memory for  
4 Visuospatial Arrays. International Journal of Neuroscience , 51 (1-2), pp. 1-8.
- 5 • Messier, J., Adamovich, S., Jack, D., Hening, W., Sage, J., Poizner, H. Visuomotor learning in immersive 3D  
6 virtual reality in Parkinson's disease and in aging. *Experimental Brain Research*, 2007, 179 (3), 457-  
7 474.
- 8 • Meulenbroek, O., Petersson, K. M., Voermans, N., Weber, B., & Fernández, G. (2004). Age differences in  
9 neural correlates of route encoding and route recognition. NeuroImage, 22 (4), pp. 1503-1514
- 10 • Millan-Calenti, J.C., Tubio, J., Pita-Fernandez, S., Gonzalez-Abraldes, I, Lorenzo, T., Fernandez-Arruty, T.,  
11 Maseda, A. Prevalence of functional disability in activities of daily living (ADL), instrumental activities  
12 of daily living (IADL) and associated factors, as predictors of morbidity and mortality. *Archives of*  
13 *Gerontology and Geriatrics*, 2010, 50, 306-310
- 14 • Moffat, S. D., & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric  
15 cognitive mapping. Behavioral Neuroscience, 116 (5), pp. 851-859.
- 16 • Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human  
17 allocentric spatial navigation. Neurobiology of Aging, 27 (7), pp. 965-972.
- 18 • Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age  
19 differences in human spatial navigation. Cerebral Cortex, 17 (6), pp. 1274-1282.
- 20 • Moffat, S.D. (2009). Aging and spatial navigation: What do we know and where do we go? Neuropsychology  
21 Review, 19 (4), pp. 478-489.
- 22 • Monacelli, A. M., Cushman, L. A., Kavcic, V., & Duffy, C. J. (2003). Spatial disorientation in Alzheimer's  
23 disease: The remembrance of things passed. Neurology, 61 (11), pp. 1491-1497.
- 24 • Money, I., Alexander, D., & Walker, H. T. (1965). Manual: Standardized road-map test of direction sense.  
25 Baltimore: Johns Hopkins Press.
- 26 • Montgomery, P., Silverstein, P., Wichmann, R., Fleischaker, K., & Andberg, M. (1993). Spatial Updating in  
27 Parkinson's Disease. Brain and Cognition, 23 (2), pp. 113-126.
- 28 • Morganti, F., Marrakchi, S., Urban, P. P., Iannocari, G. A., & Riva, G. (2009). A virtual reality based tool for  
29 the assessment of "survey to route" spatial organization ability in elderly population: Preliminary data.  
30 Cognitive Processing, 10 (suppl. 2), pp. 257-259.
- 31 • Morris, R. G., P. Garrud, J. N. Rawlins, and J. O'Keefe. (1982a). Place navigation impaired in rats with  
32 hippocampal lesions. *Nature* 297 (5868):681-683
- 33 • Morrow, D.G., Rogers, W.A. Environmental Support: An Integrative Framework. *Human Factors*, 2008,  
34 50(4), 589-613.
- 35 • Mraz, R., Hong, J., Quintin, G., Richard Staines, W., McIlroy, W.E., Zakzanis, K.K., Graham, S.J. (2003). A  
36 platform for combining virtual reality experiments with functional magnetic resonance imaging.  
37 Cyberpsychology and Behavior 6 (4), pp. 359-368.
- 38 • Näätänen R, Paavilainen P, Tiitinen H, Jiang D, Alho K. (1993) ; Attention and mismatch negativity.  
39 *Psychophysiology*, 30, 436-50.
- 40 • N'Kaoua, B. & Sauzéon, H. (2008) Evaluation cognitive et neuropsychologique à l'aide des applications RV.  
41 *In JM. Mazaux, P. Pradat-Diehl & V. Brun (Ed.), Rééducation instrumentalisée après cérébrolésion*  
42 *vasculaire*, Edition Masson.
- 43 • Newman, M. C., & Kaszniak, A. W. (2000). Spatial memory and aging: Performance on a human analog of the  
44 Morris water maze. Aging, Neuropsychology, and Cognition, 7 (2), pp. 86-93.
- 45 • O' Brien, H. L., Tetewsky, S. J., Avery, L. M., Cushman, L. A., Makous, W., & Duffy, C. J. (2001). Visual  
46 mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. Cerebral Cortex, 11 (11), pp. 1083-1092.
- 47 • Owsley C, Ball K, McGwin G Jr, et al. 1998. Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash  
48 among older adults. *JAMA* 279: 1083-1088.
- 49 • Pai MC, Jacobs WJ. Topographical disorientation in community-residing patients with Alzheimer disease. *Int J*  
50 *Geriatric Psychiatry* 2004; 19: 250-5
- 51 • Parasuraman R, Nestor PG. 1991. Attention and driving skills in aging and Alzheimer's disease. *Hum Factor*  
52 33: 539-557
- 53 • Parasuraman, R. (1998). Probing the attentive brain at work and in disease. *Psychological Science Agenda*  
54 (American Psychological Association), pp. 6-8.
- 55 • Parasuraman, R., Nestor, P., Greenwood, P. (1989). Sustained-attention capacity in young and older adults.  
56 Psychology and aging 4 (3), pp. 339-345
- 57 • Parasuraman, R., Greenwood, P.M., Haxby, J.V., Grady, C.L. (1992). Visuospatial attention in dementia of the  
58 Alzheimer type. Brain 115 (3), pp. 711-733

- 1 • 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.
- 2 • Passini, R., Pigot, H., Rainville, C., Tétreault, M.-H. (2000). Wayfinding in a nursing home for advanced
- 3 dementia of the Alzheimer's type. *Environment and Behavior*, 32 (5), pp. 684-710.
- 4 • Perry, R.J., Hodges, J.R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: a critical review.
- 5 *Brain*, 122 ( Pt 3): 383-404. Review.
- 6 • Plancher G., Nicolas S., Piolino P. (2008). Apport de la réalité virtuelle en neuropsychologie de la mémoire : étude dans le vieillissement. *Psychologie et NeuroPsychiatrie du vieillissement*, 6 (1), 7-22.
- 7 • Plancher, G, Gyselincq 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.
- 8 • Plancher, G, Tirard, A, Gyselincq 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).
- 9 • Porteus, S. D. (1950). The Porteus Maze Test and intelligence. Palo Alto, CA: Pacific Books.
- 10 • Posner MI, Petersen SE (1990) The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci* 13: 25–42.
- 11 • Pradat-Diehl, P., Peskine, A., Chevignard, M. (2006). Pourquoi évaluer les troubles neuropsychologiques en
- 12 vie quotidienne. In : Pradat-Diehl, P & Peskine, A (Eds). *Evaluation des troubles neuropsychologiques en vie quotidienne*. Springer-Verlag France, Paris, pp 1-5.
- 13 • Previc, F. (1998). The neuropsychology of 3D space. *Psychological Bulletin*, 124(2), 123-164.
- 14 • 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/Praeger
- 15 • Rainville, C., Marchand, N., & Passini, R. (2002). Performances of patients with a dementia of the Alzheimer
- 16 type in the Standardized Road-Map test of Direction Sense. *Neuropsychologia*, 40 (5), pp. 567-573.
- 17 • 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.
- 18 • 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.
- 19 • 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.
- 20 • 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.
- 21 • 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.
- 22 • 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.
- 23 • 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
- 24 • Reitan, R. M. *The trail making test: Manual for administration and scoring*. Tucson: Neuropsychology Laboratory, 1992.
- 25 • 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
- 26 • 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.
- 27 • Rizzo, A.A., Schultheis, M.T., Kerns, K. & Mateer, C. Analysis of Assets for Virtual Reality Applications in Neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 2004, 14(1-2) 207-239.
- 28 • 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
- 29 • Robert-Bobée I. (2006), —Projection de population 2005-2050 pour la France métropolitaine, Working Paper, Insee, Methodes et Résultats, n° F0603
- 30 • 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.
- 31 • 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.

- 1 • Ruddle, R.A., Lessels, S. The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM*
- 2 *Transactions on Computer-Human Interaction*, 2009, 16 (1), 1-18.
- 3 • Salthouse, T. A. (1992). Reasoning and spatial abilities. In *F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.): Handbook*
- 4 *of aging and cognition*, (pp.167-212). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 5 • Sanchez, M., Grober, E., & Birkett, D. (1997). Dementia in left brain damage. *Clinical Gerontologist*, 17, pp.
- 6 13-22.
- 7 • Sauzéon, H. & N'Kaoua, B. (2008). La Réalité Virtuelle (RV) comme outil d'évaluation cognitive de la
- 8 personne âgée. Xème Colloque International sur le Vieillessement Cognitif, Université Paris Descartes,
- 9 4-5 Septembre, France.
- 10 • Sayers, H. Desktop virtual environments: a study of navigation and age. *Interacting with Computers*, 2004, 16,
- 11 939-956.
- 12 • Scally, K., Charlton, J.L., Ianseck, R., Bradshaw, J.L., Moss, S. & Georgiou-Karistianis, N. (2011). Impact of
- 13 external cue validity on driving performance in Parkinson's disease. *Parkinson's Disease* , art. no.
- 14 159621.
- 15 • Schultheis, M.T. Himmelstein, J., Rizzo, A.A. Virtual reality and neuropsychology: Upgrading the current tools. *J*
- 16 *Head Trauma Rehabil*, 2002, 17, 379-94.
- 17 • Schwebel, D. C., Ball, K. K., Severson, J., Barton, B. K., Rizzo, M., & Viamonte, S. M. (2007). Individual
- 18 difference factors in risky driving among older adults. *Journal of Safety Research*, 38, pp. 501-509.
- 19 • Sekuler, A. B. , Bennett, P. J., Mamelak, M. (2000). Effects of aging on the useful field of view. *Experimental*
- 20 *Aging Research*, 26, pp. 103-120.
- 21 • Severson, J., Rizzo, M., Wagner, J., Cremer, J., Best, A.F., Severson, M.A. Driving
- 22 • Shallice, T., Burgess, P.W. (1991), Higher order cognitive impairments and frontal lesions in man, In *Frontal*
- 23 *Lobe Function and dysfunction* (H S Levin H M Eisenberg and A L Benton), Oxford University Press,
- 24 New York, pp.125-138.
- 25 • Shechtman, O., Classen, S., Stephens, B., Bendixen, R., Belchior, P., Sandhu, M., et al. (2007). The impact of
- 26 intersection design on simulated driving performance of young and senior adults. *Traffic Injury*
- 27 *Prevention*, 8, 78-86.
- 28 • Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). *Mental rotation of three-dimensional objects*. *Science*, 171 (3972), pp.
- 29 701-703.
- 30 • Sikkes S. A. M., De Lange-De Klerk E. S. M., Pijnenburg Y. A. L., Scheltens P., Uitdehaag B. M. J. (2009) A
- 31 systematic review of Instrumental Activities of Daily Living scales in dementia : room for
- 32 improvement. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*, 80(1), 7-12 .
- 33 • Simon, S. L., Walsh, D. A., Regnier, V. A., & Krauss, I. K. (1992). *Spatial cognition and neighborhood use:*
- 34 *the relationship in older adults. Psychology and aging*, 7 (3), pp. 389-394.
- 35 • k, K., Nilsson, L.-G., Andersson, G. (2005). Age differences and the acquisition of
- 36 spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an overview map as a
- 37 navigation aid. *International Journal of Human Computer Studies*, 63 (6), pp. 537-564.
- 38 • Spieler, D. H., Balota, D. A., & Faust, M. E. (1996). Stroop performance in healthy younger and older adults
- 39 and in individuals with dementia of the Alzheimer's type. *Journal of Experimental Psychology: Human*
- 40 *Perception and Performance*, 22, 461-479.
- 41 • Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). *A navigational guidance system in the human brain. Hippocampus*, 17
- 42 (8), 618-626.
- 43 • Spooner, D.M., Pachana, N. A. (2006). Ecological validity in neuropsychological assessment : A case for
- 44 greater consideration in research with neurologically intact populations. *Archives of Clinical*
- 45 *Neuropsychology*, 21, 327-337.
- 46 • Stirk, J.A., & Foreman, N. (2005). *Assessment of visual-spatial deficits in patients with Parkinson's disease*
- 47 *and closed head injuries using virtual environments. Cyberpsychology and Behavior*, 8 (5), 431-440.
- 48 • Stolwyk, R.J., Charlton, J.L., Triggs, T.J., Ianseck, R., Bradshaw, J. L. Neuropsychological function and driving
- 49 ability in people with Parkinson's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*,
- 50 2006, 28, 898-913.
- 51 • Stolwyk, R.J., Triggs, T.J., Charlton, J.L., Ianseck, R., Bradshaw, J.L. Impact of internal versus external cueing
- 52 on driving performance in people with Parkinson's disease. *Official Journal of the Movement Disorder*
- 53 *Society*, 2005, 20(7), 846-57.
- 54 • Sunderland, A., Harris, J. E., & Baddeley, A. D. (1983). Do laboratory tests predict everyday memory? A
- 55 neuropsychological study. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 22, 341-357.
- 56 • Taconnat, L., Clarys, D., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., Isingrini, M. (2007). Aging and strategic retrieval in a
- 57 cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. *Brain and Cognition*, 64 (1), pp.
- 58 1-6.
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65



- 1 • Tippett, W.J., Lee, J.H., Zakzanis, K.K., Black, S.E., Mraz, R., Graham, S.J.. Visually navigating a virtual  
2 world with real-world impairments: a study of visually and spatially guided performance in individuals  
3 with mild cognitive impairments. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 2009, 31(4),  
4 447-454.
- 5 • Troyer, A., K. Moscovitch, M., Winocur, G. (1997). Clustering and switching as two components of verbal  
6 fluency: Evidence from younger and older healthy adults. *Neuropsychology*, 11 (1), pp. 138-146.
- 7 • Tulving E., (2002). Episodic Memory : From Mind to Brain. *Annual Review of Psychology*, vol. 53, 1-25.
- 8 • Tuttle, S. Cassavaugh, N. & Backs, W. (2009). Attention Function Structure of Older and Younger Adult  
9 Drivers. Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver  
10 Assessment Training and Vehicle Design, pp. 506-513.
- 11 • Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Dastrup, E, Sparks, J.D., Dawson, J.D. Driving under low-contrast  
12 visibility conditions in Parkinson disease. *Neurology*, 2009, 73(14), 1103- 1110.
- 13 • Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Shi, Q., Dawson, J.D. Driver route-following and safety errors in early  
14 Alzheimer disease. *Neurology*, 2004, 63(5), 832-837.
- 15 • Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Sparks, J.D., Rodnitzky, R.L., Dawson, J.D. Impaired navigation in  
16 drivers with Parkinson’s disease. *Brain*, 2007, 130, 2433–2440.
- 17 • Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S. W., Qian, S., Rodnitzky, R. L., & Dawson, J. D. (2005). Visual dysfunction  
18 in Parkinson disease without dementia. *Neurology*, 65 (12), 1907-1913.
- 19 • Uc, E.Y., Rizzo, M., Anderson, S.W., Sparks, J., Rodnitzky, R.L., Dawson, J.D. (2006). Impaired visual search  
20 in drivers with Parkinson's disease. *Annals of Neurology* 60 (4), pp. 407-413.
- 21 • Van der Linden, M., Wijns, C., Von Frenkell, R., Coyette, F., & Seron, X. Un questionnaire d'auto-évaluation de  
22 la mémoire (QAM). Bruxelles: Editest, 1989.
- 23 • Verghese, J., Buschke, H., Viola ,L., Katz, M., Hall, C., Kuslansky, G., Lipton, R. (2002). Validity of divided  
24 attention tasks in predicting falls in older individuals: a preliminary study. *Journal of the American*  
25 *Geriatrics Society*, 50, pp. 1572-1576.
- 26 • Wechsler, D. (2001). Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition. ECPA.
- 27 • Waller, D., Bachmann, E., Hodgson, E., & Beall, A. C. (2007). The HIVE: A huge immersive virtual  
28 environment for research in spatial cognition. *Behavior Research Methods*, 39 (4), 835-843.
- 29 • Waller, D., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2004). Using virtual environments to assess directional knowledge.  
30 *Journal of Environmental Psychology*, 24 (1), pp. 105-116
- 31 • Wechsler D (1987) Wechsler Memory Scale – Revised. New York: Psychological Corporation. Traduction  
32 française : WMS-R (1991), Paris : ECPA. 3e (2001), Paris ECPA
- 33 • Wechsler D. (1997). *Wechsler Memory Scale—Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation
- 34 • Weniger, G., Siemerker, J., Schmidt-Samoa, C., Mehlitz, M., Baudewig, J., Dechent, P., & Irle, E. (2010). The  
35 human parahippocampal cortex subserves egocentric spatial learning during navigation in a virtual  
36 maze. *Neurobiology of Learning and Memory*, 93 (1), 46-55. doi: 10.1016/j.nlm.2009.08.003.
- 37 • Weniger, G., Ruhleder, M., Lange, C., Wolf, S., & Irle, E. (2011). Egocentric and allocentric memory as  
38 assessed by virtual reality in individuals with amnesic mild cognitive impairment.  
39 *Neuropsychologia*, 49 (3), 518-527.
- 40 • Werner P, Korczyn A: Mild cognitive im- pairment: conceptual, assessment, ethical, and social issues. *Clin*  
41 *Interv Aging* 2008; 3: 413–420.
- 42 • West, R.L. (1996) An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological*  
43 *Bulletin*. 120, pp. 272–292.
- 44 • Whitbourne, S. Physical changes in the aging individual. In Nordhus, I.H., Vandenbos, G.R., Berg, S.,  
45 Fromholt, P. (Eds.) *Clinical geropsychology*. Washington-DC: American Psychological Association,  
46 1998.
- 47 • Widmann C., Beinhoff U., Riepe M. (2010). Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease,  
48 *Journal of Neurobiology of Aging*
- 49 • Widmann, C.N., Beinhoff, U., Riepe, M.W. Everyday memory deficits in very mild Alzheimer's disease.  
50 *Neurobiology of Aging*, 2010, (in press).
- 51 • Wilkniss, S. M., Korol, D. L., Gold, P. E., Jones, M. G., & Manning, C. A. (1997). Age-related differences in  
52 an ecologically based study of route learning. *Psychology and Aging*, 12 (2), pp. 372-375
- 53 • Willis, S., Allen-Burge, R., Dolan, M. M., Bertrand, R. M., Yesavage, J., & Taylor, J. L. (1998). Everyday  
54 problem solving among individuals with Alzheimer's disease. *The Gerontologist*, 38, 569-577.
- 55 • Wilson, B. A, Cockburn, J., Baddeley, A. D. (1993) The Rivermead Behavioral Memory Test. Bury St  
56 Edmunds: Thames Valley Test Company. Traduction française : RBMT, Paris, ECPA.
- 57 • Wilson, P. (1997). Use of virtual reality computing in spatial learning research. In N. Foreman & N. Gillett  
58 (Eds.), *Handbook of spatial research paradigms and methodologies: Vol. I. Spatial cognition in the*  
59 *child and adult*, (pp. 181-206). Hove, U.K.: Psychology Press.
- 60
- 61

- 1 • Wolbers, T., & Hegarty, M., (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*,  
2 *14* (3), pp. 138-146.
- 3 • Woo, B.K.P., Harwood, D.G., Melrose, R.J., Mandelkern, M.A., Campa, O.M., Walston, A., Sultzer, D.L.  
4 (2010). Executive deficits and regional brain metabolism in Alzheimer's disease. *International Journal*  
5 *of Geriatric Psychiatry*, 25 (11), pp. 1150-1158.
- 6 • Wood, J.M., Worringham, C., Kerr, G., Mallon, K., Silburn, P. (2005). Quantitative assessment of driving  
7 performance in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 76 (2), pp. 176-  
8 180.
- 9 • Wright, R. E. (1981). Aging, divided attention, and processing capacity. *Journal of Gerontology*, 36, 605-614.
- 10 • Yetka, A.A., Pickwell, L.D., Jenkins, T.C. Binocular vision: Age and symptoms. *Ophthalmic Physiological*  
11 *Optics*, 1998, 9, 115-120.
- 12 • Young, S., Morris, R., Toone, B., & Tyson, C. (2007). Planning ability in adults with attention-  
13 deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology*, 21 (5), 581-589.
- 14 • Zajicek, M., Patterns for encapsulating speech interface design solutions for older adults, *Proceedings of the*  
15 *2003 ACM Conference on Universal Usability (CUU03)*, 10–11 November, Vancouver, Canada, 2003,  
16 pp. 54–60.
- 17 • Zakzanis, K. K., Quintin, G., Graham, S. J., & Mraz, R. (2009). Age and dementia related differences in spatial  
18 navigation within an immersive virtual environment. *Medical Science Monitor*, 15 (4), CR140-CR150.
- 19 • Zamarian, L., Sinz, H. Bonatti, E., Gamboz, N., Delazer, M. (2008). Normal aging affects decisions under  
20 ambiguity, but not decisions under risk. *Neuropsychology* (22), pp. 645-665.
- 21 • Zesiewicz, T.A., Cimino, C.R., Malek, A.R., Gardner, N., Leaverton, P.L., Dunne, P.B., et al. (2002). Driving  
22 safety in Parkinson's disease. *Neurology*, 59, 1787–1788.
- 23 • Zhang L, Abreu BC, Seale GS et al. (2003) A virtual reality environment for evaluation of a daily living skill in  
24 brain injury rehabilitation: reliability and validity. *Arch Phys Med Rehabil* 84 (8): 1118-24
- 25 • Zook N, Welsh MC, Ewing V. Performance of healthy, older adults on the Tower of London Revised:  
26 associations with verbal and nonverbal abilities. *Aging, Neuropsychology & Cognition* 2006; 13:1–19.

27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
**Conflit d'interet : aucun**

