UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE : Santé, Sciences Biologiques et Chimie du Vivant

UMR-CNRS 7295 Centre de Recherches sur la Cognition et l´Apprentissage
EA 2114 Psychologie des Âges de la Vie et Adaptation

THÈSE

présentée par :
Ilona MOUTOUSSAMY

soutenue le : **01 décembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Tours**
Discipline/ Spécialité : Psychologie

Implication du corps dans les performances mnésiques d'adultes âgés et d'adultes jeunes en situation de vieillissement fictif

illustration par l'activité physique et la motricité

THÈSE dirigée par :

Mme TACONNAT Laurence	Professeure, Université de Tours
Mme TOUSSAINT Lucette	Professeure, Université de Poitiers

THÈSE co-encadrée par :

Mme POTHIER Kristell	Maîtresse de Conférences, Université de Tours

RAPPORTEURS :

M BRUNEL Lionel	Professeur, Université Paul Valery Montpellier 3
Mme GYSELINCK Valérie	Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel

---

JURY : ***(directeurs, rapporteurs, examinateurs)***

Mme TACONNAT Laurence	Professeure, Université de Tours
Mme TOUSSAINT Lucette	Professeure, Université de Poitiers
Mme POTHIER Kristell	Maîtresse de Conférences, Université de Tours
M BRUNEL Lionel	Professeur, Université Paul Valery Montpellier 3
Mme GYSELINCK Valérie	Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel
M ALBINET Cédric	Professeur, Institut National Universitaire Champollion
Mme MAZEROLLE Marie	Professeure, Université de Franche-Comté
Mme BAILLY Nathalie	Professeure, Université de Tours (Présidente du jury)

REMERCIEMENTS

Malgré la difficulté que peut représenter la thèse de doctorat, ces trois années ont été très instructives et enrichissantes. De nombreuses personnes se sont retrouvées à partager, pour le pire ou le meilleur, cet épisode de vie avec moi. Puisque cette aventure arrive à sa fin pour laisser place à de nouvelles, j'aimerais remercier certaines des personnes ayant participé de près ou de loin à ce travail.

Je remercie tout particulièrement mes directrices, Laurence, Lucette et Kristell, pour leur intérêt et leur soutien, leur grande disponibilité et leurs nombreux conseils durant ces trois années de thèse. Leurs expertises personnelles m'ont permis d'aller toujours plus loin dans mes réflexions. Nos discussions m'ont toujours donné envie d'avancer, de réfléchir à de nouveaux projets, à de nouvelles idées. Ce travail de thèse a été, pour moi, un travail d'équipe auquel vous avez grandement participé. J'espère avoir la chance de retravailler avec vous à l'avenir.

Je remercie également les membres du jury - Lionel Brunel, Valérie Gyselinck, Cédric Albinet, Marie Mazerolle et Nathalie Bailly - pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail de thèse. Je suis persuadée que les riches échanges que nous aurons me permettront de faire évoluer mes futures recherches.

Je remercie également l'ensemble des membres des laboratoires auxquels se rattache ce travail de thèse, le CeRCA et le PAVEA. Merci de m'avoir offert toutes ces opportunités d'enseignement, de recherche, de collaboration et de responsabilité. Je n'oublie pas de vous remercier pour toutes les folies (jeux, ateliers de médiation) que vous m'avez permis de construire. Vous m'avez toujours encouragée à créer de nouveaux jeux toujours plus amusants ! La salle des doctorants est devenue, à de nombreuses reprises, un atelier de peinture, de création.

Un grand merci à mes collègues doctorant.e.s ou docteur.e.s pour leur soutien. À Raphaël, Marine, Hajer, Guillaume, Tiphanie, Elina pour avoir supporté mes millions de questions et mes exclamations, seule, devant mon ordinateur (et l'odeur de colle à Décopatch dans la salle des doctorants…). Merci également de m'avoir forcé à prendre des pauses et à sortir de ma grotte régulièrement. Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous.

Merci aux étudiants de licence et de master qui se sont impliqués dans ce travail, particulièrement Sarah, Savannah et Shaïma. Je vous souhaite de réussir dans vos projets personnels comme

professionnels. Merci aux nombreux volontaires ayant pris part aux études menées, avec un intérêt sans pareil pour les thématiques abordées.

Merci à ma famille, parents, frère et sœur, qui même s'ils ne comprenaient pas l'ampleur du travail et l'implication que j'y mettais, m'ont soutenue à leur façon. Un remerciement tout particulier à Rohan & Hari, mes deux merveilleux neveux qui illuminent chacune de mes journées. Merci à mes grands-parents, oncles, tantes, cousins et cousines, qui ont régulièrement pris des nouvelles de l'avancée de mon travail. Une pensée pour Ginette & Evariste, qui veillent sur moi depuis le ciel.

Merci à mes amies - Camille, Sahra, Seher, Tugba, Sakine, Laurène, Rabia, Kezban, Nolwenn, Elody, Aurelia - pour leur soutien sans faille. Merci à El Baja Boxing Academy, qui m'a permis de garder une activité physique et associative durant ces trois ans.

Enfin, merci à Georges Lucas, Disney et Electronic Arts pour tous les contenus Star Wars (films, séries, jeux) qui auraient pu me faire arrêter la thèse pour devenir un maître jedi. Mais après tout le doctorat n'est-il pas la formation de padawan permettant d'atteindre le rang de maître (de conférence) ?

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements ..... **I**
Table des matières ..... **III**
Liste des tableaux ..... **V**
Liste des figures ..... **VI**
Liste des acronymes et abréviations ..... **VII**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

CADRE THÉORIQUE **5**

CHAPITRE 1. Mémoire et vieillissement : bénéfices de l'activité physique 8
1. Modèles multisystémiques de la mémoire **8**

2. Effets du vieillissement sur la mémoire épisodique **10**
2.1. Diminution des capacités mnésiques liée à l'âge 10
2.2. Hypothèse exécutivo-frontale, West (1996, 2000) 12

3. Variabilité des performances mnésiques chez les adultes âgés **13**
3.1. Le concept de réserve 14
3.2. L'activité physique comme facteur de réserve 15
3.2.1. Qu'est-ce que l'activité physique ? 15
3.2.2. Méthodologies utilisées dans les études sur l'activité physique 16
3.2.3. Bénéfices de l'activité physique sur la mémoire 17
3.2.4. Comment expliquer les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire ? 18
Points importants – Chapitre 1 24

CHAPITRE 2. Importance de la motricité et de l'environnement social : approche incarnée et située de la cognition 25

1. Des traces mnésiques modales **25**

2. Influence de l'environnement social sur les performances mnésiques et les expériences motrices **28**

2.1. Stéréotypes et menace du stéréotype 28
2.2. Stéréotypes sur le vieillissement : quels effets sur les personnes âgées ? 30
2.2.1. Stéréotypes sur le vieillissement : effets sur les performances mnésiques 30
2.2.2. Stéréotypes sur le vieillissement : effets sur les performances motrices 34
2.3. Influence des représentations sociales sur le vieillissement chez les jeunes adultes : dans quelles conditions ? 35

3. Étudier le vieillissement mnésique d'un point de vue incarné : réflexions sur l'apport des simulateurs de vieillissement 37
3.1. Les simulateurs de vieillissement : reproduire les déclins sensori-moteurs liés à l'âge 38
3.1.1. La vue : un des sens les plus touchés par l'avancée en âge 40
3.1.2. Diminution de l'audition : un sens important mais peu étudié 41
3.1.3. Le toucher, plutôt conservé 42
3.1.4. La motricité fine et globale, capacités les plus étudiées des simulateurs de vieillissement 42
3.2. Simulateurs de vieillissement et cognition incarnée et située 45
3.2.1. La cognition incarnée et située : un lien entre sensorimotricité et mémoire 45
3.2.2. Le vieillissement : un lien entre sensorimotricité et mémoire atténué ? 47
3.2.3. Simulateurs de vieillissement et cognition incarnée : de nouvelles études à mener 51

Points importants – Chapitre 2 57

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE 58

TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX 63

Étude 1. Les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire au cours du vieillissement dépendent des ressources exécutives nécessaires à la tâche mnésique 65

Étude 2. L'effet protecteur de l'activité physique sur la mémoire épisodique au cours du vieillissement s'explique par les fonctions exécutives 87

Points importants – Études 1 & 2 105

Étude 3. Simulateur de vieillissement et performances motrices chez les jeunes adultes : les effets dépendent de la raison pour laquelle le simulateur est porté ! 106

Étude 4. Incarner une personne âgée physiquement peut-il modifier la mémoire d'adultes jeunes ? 125

Points importants – Études 3 & 4 155

DISCUSSION GÉNÉRALE 156

1. Implication du corps à différents niveaux du fonctionnement mnésique 158

1.1. L'implication du corps via l'activité physique 158

1.2. L'implication du corps via la motricité et l'environnement 160

1.3. Des liens communs entre motricité, activité physique, mémoire et environnement ? 162

2. Un modèle plus complet de l'implication du corps et de l'environnement dans le fonctionnement mnésique 164

2.1. Une approche cognitiviste vs. incarnée et située de la mémoire à un modèle plus complet du fonctionnement mnésique..... 164

2.2. Les défis pour l'étude holistique du vieillissement 166

CONCLUSION 170

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 173

ANNEXES 199

LISTE DES TABLEAUX

CADRE THÉORIQUE

Table 1. Avantages et inconvénients des différentes mesures de l'activité physique 19
Table 2. Hypothèses explicatives des effets de la menace du stéréotype sur les capacités mnésiques 32

ÉTUDE 1

Table 1. Means (and SD) of participants' characteristics by age group.....71
Table 2. Means (and SD) for the two memory tasks, updating and habitual physical activity index in each age group (younger vs. older adults) 75
S1 Table. Questions and calculation formulae from Baecke questionnaire [60] 86

ÉTUDE 2

Table 1. Means (and SD) of participants' characteristics in each age group 92
Table 2. Means (and SD) of memory scores, executive index and PA measures for each age group 96

ÉTUDE 3

Table 1. Mean (and standard deviation) participants' demographic characteristics 112
Table 2. Mean (and standard deviation) participants' score in physical activity questionnaire and in motor competences tasks for each group (posture training *vs.* aging suit) and for each condition (without and with the suit) 117

ÉTUDE 4

Table 1. Moyennes (écart-types) et comparaisons des caractéristiques des groupes expérimentaux.....132
Table 2. Moyennes (et écart-types) du niveau d'activité physique, du degré d'accord avec les stéréotypes, des performances motrices aux deux essais ainsi que des performances mnésiques pour chacune des catégories de verbes pour chacun des groupes expérimentaux 140

LISTE DES FIGURES

CADRE THÉORIQUE

Figure 1. Modèle multisystémique de la mémoire proposé par Tulving (1995) 8
Figure 2. Mécanismes sous-jacents des changements cognitifs consécutifs à la pratique d'activité physique (inspiré de Stillman et al., 2016) 22
Figure 3. Modèle bidirectionnel entre mémoire et activité physique, inspiré de Ponce et Loprinzi (2018) 23
Figure 4. Modèle Act-In de la mémoire proposé par Versace et al. (2014) 26
Figure 5. Illustration de quelques modèles de simulateurs (a) *Gerontological Test Suit (GERT)*, (b) *the Aged Simulation Set LM-060*, (c) *Age Gain Now Empathy System (AGNES)*, (d) *Genworth R70i* et (e) *Sakamoto Model M176* 39

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Figure 1. Liens étudiés dans les Études 1 et 2 (flèches en pointillés, approche cognitiviste) et les Études 3 et 4 (flèches pleines, approche incarnée et située) 59

ÉTUDE 2

Figure 1. Procedure of the episodic memory task for both encoding and retrieval phases 93
Figure 2. Mediation model and paths in older adults explaining episodic memory performance with age, PA and executive index as predictors 98

ÉTUDE 3

Figure 1. Four measures of motricity included in the Test of Motor Competence (adapted from Sigmundsson et al., 2016) 113

ÉTUDE 4

Figure 1. Procédure de la tâche de mémoire 136
Figure 2. Nombre de pions placés pour chacun des groupes aux deux essais 141
Figure 3. Vitesse de marche sur quatre mètres pour chacun des groupes aux deux essais 142
Figure 4. Temps mis pour réaliser les levers de chaise pour chacun des groupes aux deux essais 143
Figure 5. Pourcentage de bonnes réponses pour les verbes d'action manuelle, podale et de non-action, pour chaque groupe expérimental 146

DISCUSSION GÉNÉRALE

Figure 1. Liens entre capacités intrinsèques, aptitudes fonctionnelles et environnement(s) (OMS, 2015) 157
Figure 2. Représentation schématique des liens entre cognition, corps et environnement 165
Figure 3. Comparaison entre les études en contexte de laboratoire et l'*Ecological Momentary Assessment* (EMA) issu de Crawford et al. (2022) 169

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

AGNES	*Age Gain Now Empathy System*
ANCOVA	Analyse de Covariance
ANOVA	Analyse de Variance
BB	*Building Bricks*
BDNF	*Brain-Derived Neurotrophic Factor*
BMI	*Body Mass Index*
CI	*Confidence Intervals*
DMLA	Dégénérescence Maculaire Liée À L'âge
EMA	*Ecological Momentary Assessment*
FSA-14	Échelle d'Âgisme De Fraboni
GERT	*Gerontological Test Suit*
GLM	*Generalized Linear Models*
HADS	*Hospital Anxiety And Depression Scale*
HPA	Hypothalamo-Hypophyso-Surrénalien
HTW	*Heel-To-Toe Walking*
IAL	Indice d'Activité physique De Loisir
IAS	Indice d'Activité physique et Sportive
IAT	Indice d'Activité physique au Travail
IGF-1	*Insulin-Like Growth Factor-1*
MET	*Metabolic Equivalent*
MMSE	*Mini Mental State Examination*
MoCA	*Montreal Cognitive Assessment*
PA	*Physical Activity*
PB	*Placing Bricks*
SPI	*Serial Parallel Independant*
SPPB	*Short Physical Performance Battery*
VEGF	*Vascular Endothelial Growth Factor*
W/R	*Figure-Of-Eight Walking/Running*

Introduction générale

Le vieillissement de la population est un phénomène mondial pouvant s'expliquer par une diminution du taux de naissance et une augmentation de l'espérance de vie. La population européenne de plus de 60 ans pourrait avoisiner 25% d'ici 2050 (Grundy & Murphy, 2018). Ce vieillissement de la population s'accompagne d'enjeux sociétaux importants, d'un point de vue de santé publique comme financier. Le vieillissement est défini comme un processus complexe marqué par de nombreux changements pouvant affecter les activités quotidiennes, le bien-être ou encore l'autonomie des adultes âgés. Parmi les changements cognitifs, la mémoire épisodique (i.e., se remémorer des évènements personnellement vécus ainsi que leur contexte spatio-temporel) est une des premières fonctions cognitives affectées par le vieillissement (Balota et al., 2000; Craik, 2022; Luo & Craik, 2008; Nilsson, 2003; Wang et al., 2017; Zacks et al., 2000). Néanmoins, en dehors des modifications cognitives, le vieillissement est également marqué par des changements physiques (par ex. diminution de la masse musculaire, ralentissement moteur, raideurs articulaires) modifiant les capacités motrices ainsi que des changements sociaux (par ex. stéréotypes). Ces changements concomitants questionnent sur les liens existant entre la mémoire, le corps et l'environnement social. Ce travail de thèse repose sur des approches complémentaires, comprenant des apports théoriques et méthodologiques issus de différents courants (cognitiviste, cognition incarnée et située) afin d'illustrer au mieux l'importance du corps et de l'environnement dans le fonctionnement mnésique au cours du vieillissement. Ce phénomène pourrait ainsi être étudié selon deux axes de recherches principaux :

(1) Dans un premier temps, l'étude de l'activité physique pourrait illustrer l'implication du corps dans les processus généraux soutenant la mémoire. Plus précisément, les effets de l'âge sur la mémoire s'expliquent, en partie, par la diminution de processus généraux soutenant la mémoire (par ex. fonctions exécutives, West, 1996, 2000). Néanmoins, la diminution des performances mnésiques liée à l'âge n'est pas inéluctable. Certaines habitudes de vie permettent de protéger des changements mnésiques au cours du vieillissement. Parmi ces habitudes, l'activité physique semble avoir des effets bénéfiques importants sur les fonctions exécutives soutenant la mémoire (voir Raz, 2000; Reuter-Lorenz et al., 2016; Spreng et al., 2017; Stuss & Craik, 2019 pour des revues). Les études menées dans ce travail de thèse ont pour objectif d'expliquer les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire par le maintien du fonctionnement exécutif, soutenant la mémoire.

(2) Dans un second temps, l'étude des liens entre motricité et mémoire pourrait révéler l'implication du corps au sein même des traces mnésiques, telles que définies dans l'approche incarnée et située. En effet, selon cette approche, les traces mnésiques dépendraient des

expériences sensorimotrices ainsi que de l'interaction entre le corps et l'environnement (Barsalou, 2008). La diminution des performances mnésiques au cours du vieillissement serait également expliquée par la motricité, mise à mal au cours du vieillissement (Mille et al., 2023; Vallet, 2015; Vallet et al., 2017). Néanmoins, l'importance de l'environnement (aspects « situés ») n'apparaît pas toujours dans ces explications. Plus précisément, un grand nombre d'études soutient que l'environnement social, et particulièrement les représentations positives et négatives sur le vieillissement (incluant les siennes et celles des autres), influence les capacités motrices et cognitives des adultes âgés (par ex. Bouazzaoui et al., 2016; Mazerolle et al., 2015; Swift et al., 2012). Il est également possible d'étudier les effets de ces représentations sociales sur les capacités motrices et cognitives chez des adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif, notamment par la réalité virtuelle[1] (Beaudoin et al., 2020; Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015). Ce vieillissement fictif pourrait être opérationnalisé par l'utilisation de simulateurs de vieillissement dans le but d'étudier les changements cognitifs associés aux modifications motrices. Nous supposons que la diminution de la motricité liée au port de simulateur de vieillissement pourrait influencer les performances mnésiques, particulièrement lorsque cette diminution est associée aux représentations du vieillissement. Ainsi, l'interaction entre le corps et l'environnement serait cruciale dans l'émergence des traces mnésiques.

Afin de rendre compte de ces deux axes de recherche, la **première partie** de ce travail de thèse est constituée de deux chapitres introductifs. Le premier chapitre, basé sur une définition de la mémoire issue du courant cognitiviste (Tulving, 1995, 2002), décrit les effets de l'âge sur la mémoire ainsi que les hypothèses explicatives de ces effets. Ce premier chapitre permet d'illustrer l'importance du corps pour la mémoire épisodique au travers de l'activité physique. En effet, l'activité physique a été proposée comme un facteur protecteur des effets de l'âge sur la mémoire et de nombreux facteurs explicatifs ont été apportés (Albinet et al., 2008; Bherer et al., 2013; Bherer & Pothier, 2021). Le deuxième chapitre appuie l'importance du corps pour la mémoire épisodique dans une approche incarnée et située de la cognition. Plus précisément, ce chapitre présente l'aspect modal des traces mnésiques et l'importance de l'environnement social dans les performances mnésiques comme motrices. Par la suite, nous proposons l'utilisation de simulateurs de vieillissement pour étudier les liens entre mémoire, motricité et environnement.

La **seconde partie** expose la problématique générale et les objectifs du travail de thèse, sur lesquels reposent nos travaux expérimentaux.

[1] Technologie permettant d'immerger une personnes dans un environnement fictif, pouvant se rapprocher de la réalité, en trois dimensions. La personne incarne, dans cet environnement, un avatar entièrement personnalisable (âge, apparence physique, vêtements etc.).

La **troisième partie** comprend les travaux expérimentaux. Cette partie se compose de quatre études (dont une publiée et deux soumises). Les deux premiers travaux illustrent les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire au cours du vieillissement, selon une vision cognitiviste. Ces premières études mettent en évidence l'importance de l'activité physique dans les processus généraux (i.e., fonctions exécutives) soutenant la mémoire. Plus précisément, dans l'Étude 1 (Moutoussamy et al., 2022), nous avons examiné si les effets bénéfiques de l'activité physique variaient selon les tâches mnésiques (rappel indicé vs. rappel libre), impliquant différemment les ressources exécutives. En continuité, dans l'Étude 2 (Moutoussamy et al., en révision), nous avons cherché à préciser le rôle des fonctions exécutives dans les effets de l'activité physique sur la mémoire épisodique. Pour cela, un modèle de médiation présentant l'activité physique comme médiateur des effets de l'âge et des fonctions exécutives sur la mémoire a été présenté.

Les deux autres travaux ont été réalisés selon une approche incarnée et située de la cognition. Ces études mettent en évidence l'importance de la motricité au sein des traces mnésiques, dépendant du contexte environnemental. Plus précisément, dans l'Étude 3 (Moutoussamy et al., soumis), nous avons examiné un premier lien entre motricité et environnement social à l'aide de simulateurs de vieillissement. Autrement dit, cette étude permettait de confirmer que les effets des simulateurs sur les performances motrices pouvaient dépendre de l'environnement social. Par la suite, l'Étude 4 (Moutoussamy et al., en préparation) permettait d'étendre ces résultats au fonctionnement mnésique. Ainsi, nous avons exploré les modifications de la mémoire de verbes d'action ou de non-action chez des adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif à l'aide de simulateurs de vieillissement et placés dans un environnement social « menaçant » (activation des représentations sur le vieillissement).

Enfin, la **quatrième partie** présente une discussion générale et les perspectives d'études. L'apport de ce travail de thèse à la compréhension de l'importance du corps et de l'environnement dans le fonctionnement mnésique au cours du vieillissement sera développé. Cette partie permettra également de rendre compte de l'intérêt de considérer les liens dynamiques entre corps, environnement et cognition afin d'étudier au mieux le vieillissement dans sa globalité.

Cadre théorique

Sommaire

CHAPITRE 1. Mémoire et vieillissement : bénéfices de l'activité physique 8

1. Modèles multisystémiques de la mémoire 8

2. Effet du vieillissement sur la mémoire épisodique 10

2.1. Diminution des capacités mnésiques liée à l'âge 10

2.2. Hypothèse exécutivo-frontale, West (1996, 2000) 12

3. Variabilité des performances mnésiques chez les adultes âgés 13

3.1. Le concept de réserve 14

3.2. L'activité physique comme facteur de réserve 15

3.2.1. Qu'est-ce que l'activité physique ? 15

3.2.2. Méthodologies utilisées dans les études sur l'activité physique 16

3.2.3. Bénéfices de l'activité physique sur la mémoire 17

3.2.4. Comment expliquer les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire ? 18

Points importants – Chapitre 1 24

CHAPITRE 2. Importance de la motricité et de l'environnement social : approche incarnée et située de la cognition 25

1. Des traces mnésiques modales 25

2. Influence de l'environnement social sur les performances mnésiques et les expériences motrices 28

2.1. Stéréotypes et menace du stéréotype 28

2.2. Stéréotypes sur le vieillissement : quels effets sur les personnes âgées ? 30

2.2.1. Stéréotypes sur le vieillissement : effets sur les performances mnésiques 30

2.2.2. Stéréotypes sur le vieillissement : effets sur les performances motrices 34

2.3. Influence des représentations sociales sur le vieillissement chez les jeunes adultes : dans quelles conditions ? 35

3. Étudier le vieillissement mnésique d'un point de vue incarné : réflexions sur l'apport des simulateurs de vieillissement 37

3.1. Les simulateurs de vieillissement : reproduire les déclins sensori-moteurs liés à l'âge 38

3.1.1. La vue : un des sens les plus touchés par l'avancée en âge 40

3.1.2. Diminution de l'audition : un sens important mais peu étudié 41

3.1.3. Le toucher, plutôt conservé 42

3.1.4. La motricité fine et globale, capacités les plus étudiées des simulateurs de vieillissement 42

3.2. Simulateurs de vieillissement et cognition incarnée et située 45

3.2.1. La cognition incarnée et située : un lien entre sensorimotricité et mémoire 45

3.2.2. Le vieillissement : un lien entre sensorimotricité et mémoire atténué ? 47

3.2.3. Simulateurs de vieillissement et cognition incarnée : de nouvelles études à mener 51

Points importants – Chapitre 2 57

Chapitre 1

MÉMOIRE ET VIEILLISSEMENT : BÉNÉFICES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

1. MODÈLES MULTISYSTÉMIQUES DE LA MÉMOIRE

Au sein de l'approche cognitiviste, la mémoire est définie par son mode de fonctionnement spécifique, expliquant l'existence de différents systèmes de mémoire. Le modèle d'organisation hiérarchique SPI – *Serial Parallel Independant* (**Figure 1**, Tulving, 1995) – est un modèle largement accepté de nos jours pour définir la mémoire selon l'approche cognitiviste. Pour Tulving (1972, 1983, 1995, 2001, 2002), la mémoire est multi-systémique : les différents systèmes dépendent de la durée du souvenir (i.e., court ou long terme) et sont associés à des niveaux de conscience variables (i.e., anoétique, noétique et autonoétique). Il admet ainsi l'existence de cinq systèmes dont quatre sont des systèmes dits à long terme (mémoire épisodique, mémoire sémantique, mémoire procédurale et système de représentations perceptives) et un système dit à court terme (mémoire de travail).

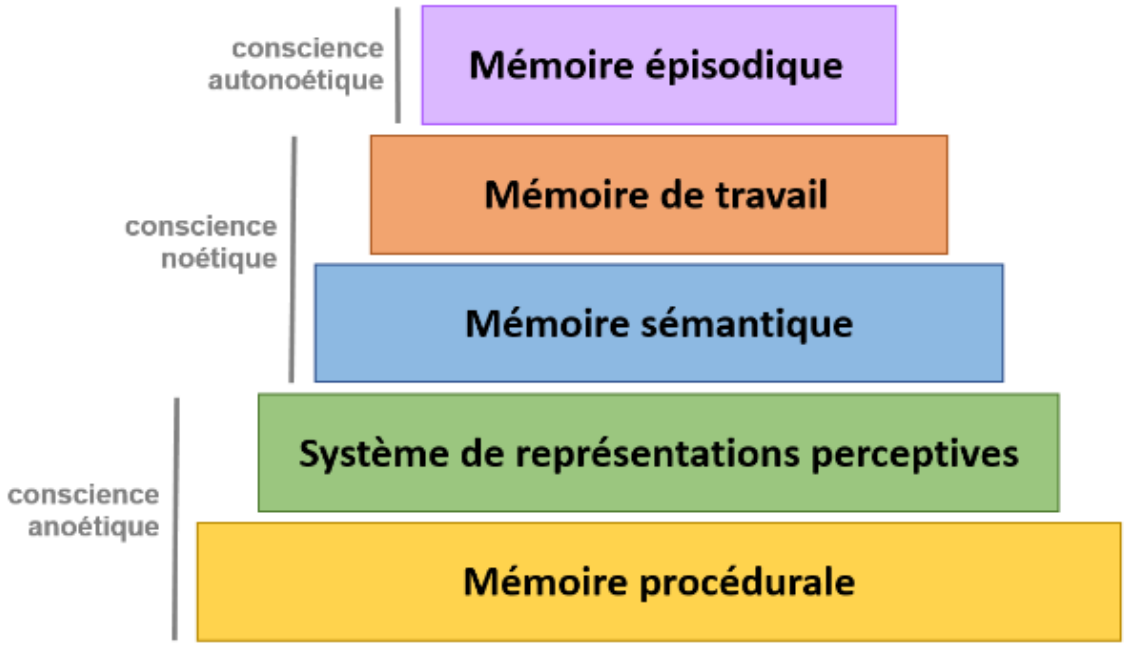


Figure 1. Modèle multisystémique de la mémoire proposé par Tulving (1995)

Le système le plus « bas » dans cette hiérarchie, la mémoire procédurale, permet l'utilisation automatique des habiletés perceptives, cognitives et/ou motrices (par ex. faire du vélo). Le

système de représentations perceptives permet le stockage des informations relatives à la forme et est responsable des effets implicites de mémoire. Ces deux systèmes de mémoire sont associés à un état de conscience anoétique (i.e., sans conscience) puisqu'ils permettent d'activer des représentations et d'exécuter certaines activités de manière automatique et inconsciente. La mémoire sémantique renvoie au stockage des connaissances générales (i.e., lexicales et conceptuelles) sans leur contexte d'acquisition. La mémoire de travail, quant à elle, permet de maintenir et manipuler de façon temporaire les informations, pendant l'exécution d'une tâche particulière. La mémoire sémantique et la mémoire de travail sont associées à un état de conscience noétique car les individus sont conscients des connaissances qu'ils possèdent sans pour autant connaître l'origine de leur savoir.

Le dernier système – celui qui nous intéresse dans ce travail de thèse – est la mémoire épisodique (Tulving, 1972, 1983, 1995, 2001, 2002). Cette mémoire permet le rappel des informations et événements personnellement vécus dans le passé mais permet aussi de se projeter dans des évènements futurs (i.e., adaptation, anticipation). Cette capacité repose sur un état de conscience dit autonoétique, permettant un voyage mental dans le temps subjectif (du passé au futur) afin de revivre les souvenirs dans leur contexte d'origine (par ex. contexte d'apprentissage dans le cadre d'une expérimentation). Tulving (1972, 1983, 1995, 2001, 2002) considère que la mémoire épisodique permet de « revivre » les souvenirs, mais il est important de noter que, dans le modèle SPI, les traces mnésiques sont abstraites et amodales. En effet, la mémoire et la perception seraient basées sur des contenus distincts, bien que des interactions soient possibles entre ces deux fonctions. Cette vision hiérarchique et verticale place la mémoire épisodique comme un traitement final réalisé à partir de la perception de l'objet et des représentations abstraites présentes en mémoire sémantique (voir Tulving, 2001 pour une revue mais Simons et al., 2002 pour des arguments contraires).

Le fonctionnement de la mémoire épisodique s'appuie sur le système frontal (Hawco et al., 2013; Moscovitch & Winocur, 2002; Stuss & Benson, 1987; Wheeler et al., 1995, 1997) impliquant les fonctions exécutives afin de mettre en place des stratégies internes efficaces au moment de l'encodage et de la récupération d'information en mémoire. Les stratégies internes sont auto-initiées (par ex. répétition, création d'images mentales, production d'indices ou d'associées) contrairement aux stratégies externes basées sur des aides ou indices environnementaux (par ex., utilisation de listes, calendrier). Ainsi, lorsqu'aucun indice n'est fourni lors de l'encodage ou de la récupération en mémoire, l'individu doit mettre en place des stratégies internes auto-initiées (comme dans les tâches de rappel libre). A l'inverse, les stratégies externes sont facilitées par la

présence d'un support environnemental lors de l'encodage ou la récupération (comme dans les tâches de rappel indicé) (Craik, 1986,1990, 2022).

2. EFFETS DU VIEILLISSEMENT[2] SUR LA MÉMOIRE ÉPISODIQUE

2.1. DIMINUTION DES CAPACITÉS MNÉSIQUES LIÉE À L'ÂGE

Des changements mnésiques sont observées chez les adultes âgés, faisant l'objet de nombreuses plaintes (Jonker et al., 2000; Tannenbaum, 2005). Un grand nombre d'études souligne une diminution des performances mnésiques liée au vieillissement (Balota et al., 2000; Luo & Craik, 2008; Nilsson, 2003; Wang et al., 2017; Zacks et al., 2000). Le modèle du support environnemental (Craik, 1986, 1990) précise que les effets du vieillissement sur la mémoire dépendent de l'aide environnementale fournie. Ainsi, les effets de l'âge sur les performances mnésiques sont moins importants lorsque la tâche fournit une aide environnementale afin de guider les processus d'encodage (Froger et al., 2009, 2012; Taconnat et al., 2006, 2022; Taconnat & Isingrini, 2004) et de récupération (Angel et al., 2010; Danckert & Craik, 2013; Froger et al., 2009; Sauzeon et al., 2000; Taconnat et al., 2007). Par exemple, les effets de l'âge sur les performances mnésiques sont plus marqués lors de tâches mnésiques ne fournissant aucun support orientant la récupération de l'information (par ex. rappel libre). En revanche, ces effets sont moins marqués voire non significatifs lors de tâches mnésiques fournissant un support environnemental à la récupération (par ex. rappel indicé par trigrammes, reconnaissance) (voir Craik, 2022 pour une revue). Ces observations sont confirmées par les méta-analyses, indiquant une taille d'effet de l'âge plus importante pour les tâches de rappel libre que pour la reconnaissance (*Hedges' g* = 0.89 et 0.54 respectivement[3], Rhodes et al., 2019 et voir La Voie & Light, 1994 pour des résultats similaires). Plus précisément, fournir un support environnemental permet de réduire les processus auto-initiés nécessaires à la mise en place de stratégies mnésiques. En d'autres termes, lorsqu'aucun support environnemental n'est fourni, l'encodage et la récupération de l'information se font à l'aide de stratégies auto-initiées. La mise en place de ces processus stratégiques est particulièrement coûteuse pour les adultes âgés (Taconnat & Isingrini, 2004). A l'inverse, lorsqu'un support environnemental est fourni, moins

[2] La plupart des études réalisées en psychologie cognitive définissent les adultes âgés comme des personnes ayant entre 60 à 80 ans, tandis que les adultes jeunes sont âgés de 20 à 40 ans. Les études mentionnées dans ce travail de thèse prennent en compte les caractéristiques respectives de ces deux groupes d'âge, dans le cas contraire, l'âge moyen est indiqué.

[3] Un *g* de Hegde autour de 0.2 décrit un effet « faible », autour de 0.5 un effet « moyen » et autour de 0.8 un effet « fort »

de processus auto-initiés sont nécessaires puisque l'encodage et la récupération de l'information sont guidées par un indice. Les effets de l'âge sur les tâches proposant un support environnemental sont donc réduits.

Des études réalisées à l'aide de protocole de rappel de source précisent que les difficultés mnésiques liées à l'âge seraient particulièrement visibles lorsque la récupération implique de spécifier le contexte d'acquisition (par ex. emplacement sur l'écran, couleur de fond ou du texte, voix utilisée lors de la présentation etc.) (Kukolja et al., 2009; Rahhal et al., 2002 et voir Mitchell & Johnson, 2009 pour une revue). Ces éléments sont confirmés par des études utilisant le paradigme *Remember/Know*, paradigme dans lequel il est possible de distinguer les réponses liées à un processus de remémoration « épisodique » (réponses *« Remember »*, l'information a été récupérée avec son contexte d'acquisition) des réponses liées à la familiarité (réponses *« Know »*, moins coûteuses en ressources, ne nécessitant pas la récupération du contexte d'acquisition) lors d'une tâche de reconnaissance (Tulving, 1985). Par exemple, Bugaiska et al. (2007) montrent que les réponses *« Remember »* sont moins produites par les adultes âgés comparativement aux plus jeunes tandis que les réponses *« Know »* sont autant produites dans les deux groupes d'âge (voir Boywitt et al., 2012; Clarys et al., 2002, 2009 pour des études montrant des résultats similaires). Enfin, la méta-analyse de Koen et Yonelinas (2014) confirme ces résultats en indiquant que l'effet de l'âge sur les réponses liées à la familiarité est significativement moins important que sur les réponses liées à une recollection épisodique. Ainsi, contrairement aux processus sous-tendant la recollection, les processus de familiarité seraient moins affectés par le vieillissement normal. Les adultes âgés se baseraient davantage sur ces processus de familiarité lors des tâches de reconnaissance. De plus, cette tendance à se baser sur la familiarité (et non sur les éléments contextuels) lors des tâches de reconnaissance les amène à produire plus d'erreurs de mémoire (fausses alarmes, i.e., items nouveaux reconnus comme anciens), expliquant également la diminution des performances (Abichou et al., 2021; Chan & McDermott, 2007; Isingrini et al., 1995; Jacoby et al., 2005 et voir Jacoby & Rhodes, 2006; Taconnat & Rémy, 2006 pour des revues et Fraundorf et al., 2019; McCabe et al., 2009 pour des méta-analyses).

Ainsi, les changements mnésiques ne seraient pas liés à une difficulté de stockage, mais plutôt à des difficultés stratégiques lors de l'encodage et de la récupération de l'information – particulièrement de l'information contextuelle caractérisant les souvenirs épisodiques (voir Craik, 2022; Isingrini & Taconnat, 2008 pour des revues).

2.2. HYPOTHÈSE EXÉCUTIVO-FRONTALE, WEST (1996, 2000)

Différentes hypothèses explicatives ont été proposées afin de rendre compte des modifications mnésiques observées avec l'avancée en âge (par ex. déficit exécutif, diminution de la vitesse de traitement, Salthouse, 1996 ; diminution des ressources attentionnelles, McDowd & Craik, 1988). Parmi ces hypothèses, majoritairement issues des courants cognitivistes, seule l'hypothèse d'une diminution exécutive sera détaillée pour son implication dans les étapes d'encodage et de récupération, sur lesquelles se focalise une partie de ce travail de thèse.

Les fonctions exécutives sont définies comme « un ensemble de processus cognitifs dont le rôle principal est de faciliter l'adaptation de l'individu aux situations nouvelles et/ou complexes, en particulier lorsque les habiletés cognitives sur-apprises ne sont plus suffisantes » (Collette & Salmon, 2014, p. 257). Miyake et al. (2000) distinguent trois fonctions exécutives spécifiques. L'inhibition est la capacité à supprimer des informations non pertinentes pour la tâche en cours. La flexibilité se définit comme la capacité à alterner entre deux tâches de façon rapide et fluide. Enfin, la mise à jour en mémoire de travail correspond à la capacité à supprimer des informations pour en inclure de nouvelles en mémoire de travail. D'autres auteurs considèrent également l'existence de fonctions exécutives plus complexes construites à partir des fonctions spécifiques décrites ci-dessus, telles que la planification, le raisonnement ou encore la résolution de problèmes (Cristofori et al., 2019; Diamond, 2013). Les fonctions exécutives étant des fonctions transversales – impliquées dans un grand nombre de fonctions cognitives – les changements observés sur les performances aux tâches exécutives peuvent affecter les autres fonctions cognitives qui en dépendent, notamment la mémoire (West, 1996, 2000).

L'hypothèse dysexécutive proposée par West (1996, 2000) explique les changements mnésiques liés à l'âge par les modifications structurelles et fonctionnelles des régions frontales, sièges des fonctions exécutives (Dennis & Cabeza, 2011; Raz et al., 2005). Ainsi, cette hypothèse suggère que les changements mnésiques sont liés à la diminution des capacités exécutives. En effet, les études sur les effets du vieillissement sur les fonctions exécutives ont mis en évidence une diminution des capacités exécutives au cours du vieillissement que ce soit sur les performances d'inhibition, de flexibilité, de mise à jour en mémoire de travail ou encore de fonctions exécutives complexes (Adolfsdottir et al., 2016; Allain et al., 2005; Artuso et al., 2017; Bopp & Verhaeghen, 2018; Fisk & Sharp, 2004; Idowu & Szameitat, 2023; Turner & Spreng, 2012; Yaple et al., 2019; Zuber et al., 2019 et voir Raz, 2000; Reuter-Lorenz et al., 2016; Spreng et al., 2017; Stuss & Craik, 2019 pour des revues).

Chez les adultes âgés, la diminution des performances exécutives se traduit par des difficultés dans la mise en place des stratégies mnésiques, et particulièrement des stratégies internes (Bouazzaoui et al., 2010). Ainsi, les modifications des fonctions exécutives expliquent l'effet de l'âge plus marqué sur les tâches mnésiques nécessitant le plus de stratégies auto-initiées (Bouazzaoui et al., 2013, 2014; Bugaiska et al., 2007; Butler et al., 2004; Crawford et al., 2000; Head et al., 2008; Troyer et al., 1994 et pour revue voir Isingrini & Taconnat, 2008). Ces changements de performances exécutives expliquent également les difficultés de récupération de la source ou encore le nombre plus important de fausses alarmes (voir pour revue Devitt & Schacter, 2016). Par exemple, lors d'une tâche de rappel libre (ne fournissant aucun support environnemental), les performances des adultes âgés sont expliquées par l'utilisation de stratégies internes auto-initiées. Cependant, lorsque les performances exécutives (score composite de trois tâches) sont contrôlées, les stratégies internes n'expliquent plus les performances mnésiques (Guerrero-Sastoque et al., 2021). Ainsi, les fonctions exécutives permettraient l'utilisation de stratégies internes efficientes, soutenant les performances de mémoire dans les tâches coûteuses (Guerrero-Sastoque et al., 2021). La diminution des capacités exécutives liée à l'âge se traduit donc par des difficultés dans la mise en place de stratégies mnésiques auto-initiées efficaces (Guerrero-Sastoque et al., 2019; Taconnat et al., 2007, 2009 et pour revue voir Taconnat & Lemaire, 2014).

3. VARIABILITÉ DES PERFORMANCES MNÉSIQUES CHEZ LES ADULTES ÂGÉS

Le vieillissement est souvent défini et perçu comme un phénomène biologique inéluctable causant des changements au niveau des capacités intrinsèques, c'est-à-dire des capacités physiques et mentales que possède un individu (i.e., sensoriel, physique, cognitif, psychologique) (World Health Organization, 2015). Malgré un consensus sur l'existence d'une diminution des performances cognitives au cours du vieillissement, il est important de souligner l'hétérogénéité observée dans la population âgée, tant au niveau intra-individuel (i.e., entre les capacités intrinsèques d'un même individu) qu'au niveau inter-individuel (i.e., entre les adultes âgés). Ainsi, les performances à des tâches de mémoire, de fonctionnement exécutif ou de vitesse de traitement diminuent avec l'avancée en âge alors que d'autres se maintiennent voire augmentent (i.e., vocabulaire). De la même façon, les performances cognitives dans les tâches les plus affectées par l'avancée en âge varient d'une personne à une autre : une personne âgée peut donc conserver des performances cognitives importantes malgré son vieillissement.

3.1. LE CONCEPT DE RÉSERVE

Les variations intra- et inter-individuelles de performances s'expliquent en partie par l'hypothèse de la réserve (Stern, 2002; Stern et al., 2019, 2020, 2023). La réserve est définie comme un ensemble de mécanismes cérébraux et/ou de processus cognitifs, influencés par différents facteurs génétiques et environnementaux permettant de faire face aux effets délétères d'une pathologie ou, pour ce travail de thèse, du vieillissement (Bartrés-Faz & Arenaza-Urquijo, 2011; Tucker & Stern, 2014). En d'autres termes, la constitution cérébrale et les habitudes de vie influencent les effets de l'âge sur la cognition, expliquant la variabilité des performances cognitives chez les adultes âgés. Différents mécanismes sont impliqués dans l'hypothèse de la réserve (Stern, 2002; Stern et al., 2019, 2020, 2023) : la réserve cérébrale, la neuroprotection (*brain maintenance*) et la réserve cognitive.

La réserve cérébrale fait référence aux caractéristiques cérébrales (i.e., taille et nombre de neurones, densité synaptique). La quantité de substrats neurophysiologiques du cerveau a une importance dans l'apparition des changements cognitifs apparaissant au cours du vieillissement. En d'autres termes, la diminution des performances cognitives sera moins marquée chez une personne âgée ayant une réserve cérébrale importante, l'apparition de changements cognitifs étant visible que lorsque les dommages cérébraux sont plus importants (Foubert-Samier et al., 2012, pour revue voir Schofield, 2003). Ce mécanisme n'implique pas d'adaptation des processus structurels ou fonctionnels et est donc considéré comme une forme « passive » de la réserve.

La neuroprotection (*brain maintenance*) est basée sur les propriétés dynamiques du cerveau. Elle se définit comme « l'absence relative de changements dans les ressources neuronales ou neuropathologiques au fil du temps comme un déterminant de la cognition chez les personnes âgées » (Gazes et al., 2023). Ce mécanisme se traduit par des changements cérébraux liés à l'âge moins importants, certains facteurs génétiques et habitudes de vie protégeant des altérations cérébrales (Gazes et al., 2023; Nyberg et al., 2012).

Enfin, la réserve cognitive peut être décrite comme un modèle « actif » de la réserve puisque ce mécanisme implique des changements dynamiques dans l'utilisation des processus cognitifs. Les expériences individuelles permettent de construire un ensemble de ressources cognitives permettant de compenser les effets du vieillissement sur la cognition, que ce soit par l'utilisation de réseaux préexistants dans le but d'améliorer l'efficacité (réserve neurale) ou par l'utilisation de réseaux nouveaux (compensation neurale) (Barulli & Stern, 2013). Ainsi, une personne âgée

ayant une réserve cognitive importante peut faire face aux effets délétères du vieillissement en recrutant des réseaux alternatifs et maintenir ses performances cognitives (Stern, 2002; Stern et al., 2019, 2020, 2023).

Les études concernant la réserve se sont multipliées et de nombreuses habitudes de vie ont été identifiées comme favorisant la plasticité cérébrale et le fonctionnement cognitif (Pettigrew & Soldan, 2019; Song et al., 2022; Whalley et al., 2004). Parmi ces habitudes de vie, les activités de loisir (Lee et al., 2020), le niveau d'éducation (Clouston et al., 2020), les activités professionnelles (Andel et al., 2007), les activités sociales (Ertel et al., 2008) ou encore les activités physiques (Hayes et al., 2015) sont les plus étudiées. D'autres facteurs d'ordre psycho-affectif sont aussi de plus en plus étudiés pour leurs bénéfices sur le fonctionnement cognitif avec l'âge, tels que la personnalité (Colombo et al., 2020). Parmi les différents facteurs de réserve cités, ce travail de thèse se focalise sur l'activité physique et ses bénéfices sur les capacités intrinsèques.

3.2. L'ACTIVITÉ PHYSIQUE COMME FACTEUR DE RÉSERVE

3.2.1. QU'EST-CE QUE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE ?

L'activité physique se réfère à l'ensemble des « mouvements corporels, produits par les muscles squelettiques et entraînant une dépense énergétique au-dessus du taux métabolique au repos » (Caspersen et al., 1985). Cette définition comprend de nombreuses activités quotidiennes (professionnelles, domestiques, de loisir) impliquant des mouvements, telles que les déplacements à pied ou à vélo, le ménage, le jardinage. Dans la littérature, l'activité physique est arbitrairement classée en catégories. Les activités de type aérobie font intervenir de façon continue les capacités cardiovasculaires (par ex. cyclisme, danse, jogging ou natation). Les activités de type résistance impliquent l'utilisation de charges (que ce soit le poids du corps ou les haltères) afin de renforcer certains groupes musculaires et par conséquent la condition physique (i.e., muscles squelettiques) (par ex. musculation avec charge ou exercices de flexion/extension des genoux). Les activités de type *mind-body* incluent à la fois des mouvements corporels, un contrôle et une concentration particulière sur la respiration (par ex. yoga, Taï Chi, pilates). L'activité physique, en fonction de ses caractéristiques (type, intensité, fréquence, volume), peut modifier la condition physique (ou *fitness*) – capacités cardiorespiratoires (i.e., endurance) et aptitudes musculaires ou articulaires (par ex. force, souplesse, agilité, équilibre, coordination, etc.) – qu'une personne possède ou atteint lors d'un effort physique. Le terme « exercice physique » renvoie, quant à lui, à une sous-catégorie d'activité physique impliquant des mouvements corporels planifiés, structurés et répétés dans

l'objectif de favoriser le maintien ou l'amélioration d'une ou plusieurs composantes des conditions physiques (Caspersen et al., 1985). La distinction entre les termes « activité physique » et « exercice physique » n'est cependant pas toujours faite dans la littérature. Enfin, les activités sportives font référence aux exercices physiques réalisés dans le but d'améliorer ses compétences dans une activité présentant des règles spécifiques.

3.2.2. MÉTHODOLOGIES UTILISÉES DANS LES ÉTUDES SUR L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Les études portant sur les bénéfices de l'activité physique peuvent être conduites à l'aide de méthodologies diverses et évaluer différentes fonctions cognitives (par ex. mémoire, fonctions exécutives, attention, fonctions visuo-spatiales). Il est possible de s'intéresser aux effets bénéfiques d'une unique période d'activité physique (dite activité physique aiguë, voir Loprinzi et al., 2019 pour revue) comme d'une période d'activité physique plus longue (allant de quelques semaines à plusieurs années, dite chronique) sur la cognition.

Les effets chroniques de l'activité physique, sur lesquels se focalise ce travail de thèse, sont étudiés au moyen de protocoles expérimentaux interventionnels ou non-interventionnels. Lors d'études interventionnelles, les participants (ou un groupe de participants) suivent un programme d'activité physique dont les modalités varient. Ainsi, grâce aux mesures pré- et post- intervention réalisées, il est possible d'examiner les liens de causalité entre la pratique d'activité physique et les changements cognitifs observés. Parmi les études non-interventionnelles, on peut distinguer les études longitudinales et transversales. Les études longitudinales permettent un suivi dans le temps d'un groupe de participants afin d'estimer l'évolution des capacités cognitives et/ou cérébrales en fonction de l'activité physique pratiquée par chacun. Les études transversales permettent de comparer à un moment précis les performances cognitives d'individus en fonction de leur niveau d'activité physique et/ou de leur âge. Ces études non-interventionnelles ne permettent pas d'établir un lien de causalité direct entre l'activité physique et les performances cognitives, bien que ce lien puisse être estimé à l'aide d'analyses statistiques particulières (i.e., analyse de médiation). Malgré cela, le coût et les difficultés de faisabilité des études transversales sont moins importants et permettent d'obtenir des indications intéressantes pour la mise en place d'études dans lesquelles les liens de cause à effet pourront être identifiés.

De par sa multi-dimensionnalité et sa complexité, l'activité physique peut être mesurée de différentes façons. Bien que de nombreux débats existent quant à la méthode la plus appropriée pour rendre compte de l'activité physique d'un individu, il est important de noter que ces différentes mesures ont chacune des avantages et inconvénients (voir **Table 1**), pouvant être

complémentaires, et que le choix de la mesure pourra donc dépendre des objectifs de l'étude (voir Vanhees et al., 2005 pour une revue des différentes mesures). Les indicateurs « objectifs » comprennent des mesures représentant les capacités cardiovasculaires, musculaires ou articulaires et des mesures comportementales. Les activités physiques peuvent également être auto-rapportées (par le participant lui-même), ou hétéro-rapportées (par un observateur) à l'aide de questionnaires (Bigard et al., 1992; Crinière et al., 2011; de Souto Barreto et al., 2011; Rivière et al., 2018; Robert et al., 2004; Vuillemin et al., 2000 pour des questionnaires traduits en français ; Vuillemin et al., 2012 pour une revue critique). Ces questionnaires peuvent être plus ou moins longs (une question, Kachouri et al., 2022 à un nombre plus importants d'items, Bigard et al., 1992) et les réponses peuvent être quantifiées de différentes façons (par ex. calories, équivalents métaboliques, nombre, durée et/ou fréquence de la pratique), sur des périodes de rappel variables.

3.2.3. BÉNÉFICES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LA MÉMOIRE

De nombreuses revues discutent de la pratique d'activité physique comme un facteur de réserve permettant de limiter les effets de l'âge sur la cognition (Albinet et al., 2008; Bherer et al., 2013; Bherer & Pothier, 2021; Esiri & Chance, 2012; Lautenschlager et al., 2012; Nithianantharajah & Hannan, 2009; Pettigrew & Soldan, 2019; Song et al., 2022). Certaines études, qui ne seront pas développées dans ce manuscrit, indiquent que les effets bénéfiques peuvent également être observés chez les adultes jeunes (Guiney et al., 2015). Néanmoins, l'âge est considéré comme un modérateur du lien entre activité physique et cognition, c'est-à-dire que les bénéfices sont plus importants chez les adultes âgés (Colcombe & Kramer, 2003; Etnier et al., 1997). Par exemple, une étude transversale a comparé des adultes jeunes et des adultes âgés en fonction de leur niveau d'activité physique (nombre de pas mesuré à l'aide d'un actimètre sur une moyenne de 6 jours) lors de tâches mnésiques (*Brief Visuospatial Memory Test-Revised* et subtest du *Wechsler Memory Scale-Third Edition*). Les résultats montrent un lien positif entre l'activité physique et la mémoire uniquement chez les adultes âgés, indiquant que ceux ayant un niveau d'activité physique important ont également de meilleures performances mnésiques (Hayes et al., 2015, voir aussi Bullock et al., 2018; Bunce & Murden, 2006; Chan et al., 2005; de Lima et al., 2019; Flöel et al., 2010; Kachouri et al., 2022). Ce lien entre activité physique et mémoire chez les adultes âgés est également observé dans les études longitudinales. Les résultats de Hamer et al. (2018) issus de l'*English Longitudinal Study of Ageing* indiquent que les performances mnésiques des adultes âgés les moins actifs lors des dix années passées diminuent,

particulièrement chez les femmes, comparativement aux adultes âgés plus actifs (voir Engeroff et al., 2018 pour une revue systématique d'études transversales et longitudinales).

Enfin, les études interventionnelles, pour lesquelles le lien de causalité peut être mis en évidence, confirment les conclusions des études non-interventionnelles. Par exemple, dans l'étude de Ruscheweyh et al. (2011), des adultes âgés ont été répartis en trois groupes – activité physique d'intensité moyenne (marche nordique), d'intensité faible (gymnastique douce) ou aucune activité physique (pas d'intervention spécifique, groupe contrôle) – pour un programme de six mois, comprenant 50 minutes d'activité trois fois par semaine. Les résultats montrent que les deux groupes d'adultes âgés ayant suivi le programme d'activité physique améliorent leurs performances mnésiques suite aux six mois d'intervention (voir Cassilhas et al., 2007; Fabre et al., 2002; Kovacevic et al., 2020 pour des résultats similaires mais aussi Legault et al., 2011; Oken et al., 2006 pour des résultats non significatifs). La méta-analyse de Northey et al. (2018) indique néanmoins que les bénéfices diffèrent selon l'intensité de l'activité physique, suggérant qu'une intensité au moins modérée (entre 3 et 6 METs[4]) est nécessaire à la préservation des capacités cognitives malgré l'avancée en âge.

Bien que toutes les études ne mettent pas en évidence d'effets bénéfiques sur la mémoire, l'accumulation de résultats ainsi que les méta-analyses permettent de conclure en l'existence de bénéfices de l'activité physique sur la mémoire (voir Aghjayan et al., 2022; Barha et al., 2017; Klimova & Dostalova, 2020; Sanders et al., 2019). Les différences de résultats observées peuvent s'expliquer par des variabilités méthodologiques importantes tant sur la façon d'évaluer l'activité physique que sur les mesures cognitives utilisées.

3.2.4. COMMENT EXPLIQUER LES BÉNÉFICES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LA MÉMOIRE ?

3.2.4.1. LES FONCTIONS EXÉCUTIVES : ÉTUDES COMPORTEMENTALES

Les fonctions exécutives, impliquées dans les processus mnésiques, semblent être une des fonctions cognitives bénéficiant le plus de la pratique d'activité physique (taille d'effet *Hedge's g* = 0.68 pour les tâches exécutives dans la méta-analyse de Colcombe & Kramer, 2003 mais *Hedge's g* = 0.12 dans Smith et al., 2010)[5]. De nombreuses études transversales (Boucard et al., 2012; Dai et al., 2013; Gajewski & Falkenstein, 2015; Hillman et al., 2006; Huang et al., 2014; Ingold et al., 2020; Netz et al., 2011; Voelcker-Rehage et al., 2010; Wilbur et al., 2012),

[4] Les METs correspond à un équivalent métabolique de la tâche, c'est-à-dire le rapport de l'énergie dépensée lors d'une activité physique par rapport à l'énergie dépensée par le métabolisme de base (i.e., 1 MET, la dépense énergétique en position assise).
[5] Un *g* de Hegde autour de 0.2 décrit un effet « faible », autour de 0.5 un effet « moyen » et autour de 0.8 un effet « fort »

Table 1. Avantages et inconvénients des différentes mesures de l'activité physique

Type de mesures	Avantages	Inconvénients	Exemples d'étude sur les effets de l'activité physique sur la cognition
Capacités cardiovasculaires, musculaires ou articulaires (par ex. VO_2 max et VO_2 peak, test du lever de chaise, appui unipodal)	Moins sujet à la subjectivité et à l'interprétation que les mesures auto-rapportées	Mesures indirectes de l'activité physique Coût financier Plutôt de petits échantillons	Albinet et al., 2010; Bullock et al., 2018; Cassilhas et al., 2007; Chodzko-Zajko et al., 1992; Fabre et al., 2002; Kovacevic et al., 2020; Netz et al., 2011; Oken et al., 2006; Voelcker-Rehage et al., 2010
Indicateurs comportementaux (par ex. podomètre, actimètre)	Moins sujet à la subjectivité et à l'interprétation que les mesures auto-rapportées	Coût financier Durée d'évaluation de l'activité physique limitée Désirabilité sociale (par ex. faire plus d'activité physique la semaine où le podomètre/actimètre est porté) Certains outils (par ex. podomètre) ne permettent pas de représenter l'ensemble des activités physiques (par ex. musculation) ni leur intensité	Boucard et al., 2012; Hayes et al., 2015; Wilbur et al., 2012
Mesures auto-rapportées (par ex. questionnaires)	Facile d'utilisation (études épidémiologiques ou échantillons importants ; utilisation auprès de différentes populations ; et dans différents pays) Classification des activités physiques en fonction de leur intensité, volume, type et fréquence. Permet de représenter une période importante de la vie (par ex. depuis l'enfance, sur l'année passée) Coût financier	Évaluation indirecte Subjectivité (par ex. fiabilité des souvenirs, désirabilité sociale, motivation, surestimation) Précision des réponses pouvant être affectée par une mauvaise compréhension des questions Nécessite une validation psychométrique préalable (par ex. validation externe avec des indicateurs physiologiques et/ou comportementaux)	Chan et al., 2005; Dai et al., 2013; de Lima et al., 2019; Hillman et al., 2006; Huang et al., 2014; Ingold et al., 2020; Kachouri et al., 2022; Ruscheweyh et al., 2011; Woo & Sharps, 2003

longitudinales (Frederiksen et al., 2015; Hamer et al., 2018), et interventionnelles (Albinet et al., 2010; Cassilhas et al., 2007; Colcombe et al., 2004; Kovacevic et al., 2020; Kramer et al., 1999; Liu-Ambrose, 2010) confirment ce bénéfice de l'activité physique sur l'ensemble des fonctions exécutives chez les adultes âgés.

Certains auteurs (Hall et al., 2001) suggèrent que les bénéfices de l'activité physique sur la cognition seraient plus importants dans les tâches nécessitant des fonctions exécutives que dans celles ne nécessitant pas ou moins ces ressources. Ces effets seraient particulièrement visibles au cours du vieillissement puisque les changements cognitifs sont majoritairement en lien avec la diminution de l'efficience exécutive (West, 1996, 2000). Pour appuyer ces propos, différentes études indiquent que les bénéfices de l'activité physique seraient observés particulièrement lors de tâches complexes (Chodzko-Zajko, 1991; Chodzko-Zajko et al., 1992; Woo & Sharps, 2003). Par exemple, les résultats de Woo et Sharps (2003) indiquent une interaction entre le niveau d'activité physique (auto-rapporté) et le type d'items (mots *vs.* images) à restituer lors d'une tâche de rappel libre chez les adultes âgés. Cette interaction montre que les adultes âgés pratiquant le moins d'activité physique rappellent moins bien les mots que les images, différence qui n'est pas observée chez les adultes âgés pratiquant le plus d'activité physique. Plus précisément, les images permettent un double codage (Paivio & Csapo, 1973) qui favoriserait la mémorisation des items chez les adultes âgés, indépendamment de leur niveau d'activité physique. A l'inverse, un encodage simple est réalisé lors de l'apprentissage des mots, ce qui nécessite plus de ressources cognitives. Dans cette condition, les mots sont mieux retenus par les adultes âgés ayant un niveau d'activité physique plus élevé. Néanmoins, la complexité de la tâche mnésique à réaliser n'a pas directement été mise en lien avec l'implication des fonctions exécutives. Jusqu'à présent, cette hypothèse n'avait pas été testée lors de tâches mnésiques, malgré l'importance des fonctions exécutives dans les aspects stratégiques de la mémoire (voir Isingrini & Taconnat, 2008). Une partie des travaux expérimentaux de thèse (Études 1 et 2) investigue ces liens.

3.2.4.2. MÉCANISMES NEUROPHYSIOLOGIQUES SOUS-JACENTS

De plus en plus de recherches portent sur les mécanismes sous-jacents des bénéfices de l'activité physique sur la cognition, dont la mémoire (voir Albinet et al., 2008; Mandolesi et al., 2018; Marmeleira, 2013; Quigley et al., 2020; Ratey & Loehr, 2011; Stillman et al., 2016 pour des revues). Il semblerait que l'activité physique induise des changements à différents niveaux qui peuvent s'influencer (moléculaire, cellulaire, cérébral, comportemental), représentant des composants d'un mécanisme beaucoup plus complexe (voir **Figure 2**).

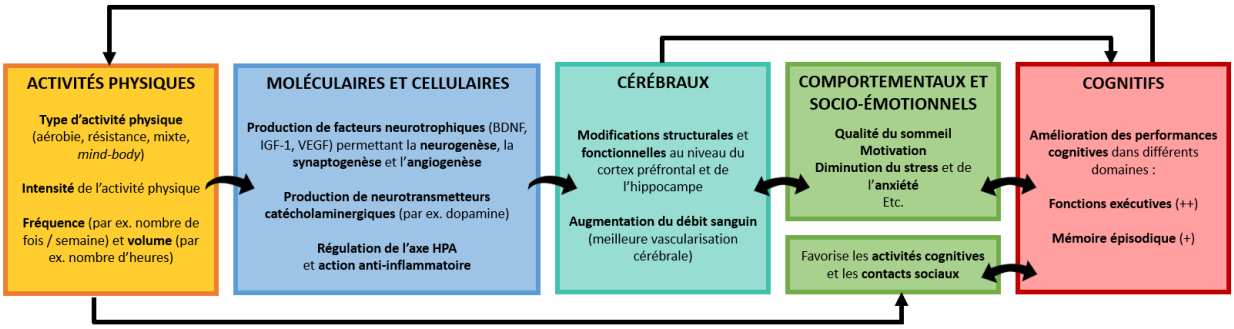


Figure 2. Mécanismes sous-jacents des changements cognitifs consécutifs à la pratique d'activité physique (inspiré de Stillman et al., 2016)

3.2.4.2.1. MODIFICATIONS MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES

Les études sur les niveaux moléculaires et cellulaires sont essentiellement issues des travaux chez l'animal, bien que quelques études aient été réalisées chez l'humain (voir McMorris, 2016 pour une revue). Ces études indiquent que les bénéfices de l'activité physique sur la cognition peuvent en partie s'expliquer par des changements dans l'expression de facteurs neurotrophiques (protéines cérébrales), dont le BDNF (*Brain-Derived Neurotrophic Factor),* l'IGF-1 (*Insulin-like Growth Factor-1*) ou le VEGF (*Vascular Endothelial Growth Factor)* (Coelho et al., 2012; Erickson et al., 2011; Ruscheweyh et al., 2011; Voss et al., 2013 chez des adultes âgés, Borst et al., 2001; Whiteman et al., 2014 chez des adultes jeunes, et voir Coelho et al., 2013; Huang et al., 2014; Lafenetre et al., 2011 pour des revues). Ces différents facteurs neurotrophiques sont impliqués dans la neurogenèse (i.e., formation de nouveaux neurones à partir de cellules souches), la synaptogenèse (i.e., formation de nouvelles connexions synaptiques et renforcement des connexions existantes via la potentialisation à long terme) ou encore l'angiogenèse (i.e., formation de nouveaux vaisseaux sanguins à partir de vaisseaux préexistants) (Vivar et al., 2012). Ces trois processus cellulaires affectés par le vieillissement jouent un rôle important dans la structure et le fonctionnement cérébral, et donc, dans les performances cognitives (Hodges et al., 2018; Isaev et al., 2019).

Les effets de l'activité physique au niveau moléculaire s'observeraient également par une augmentation des neurotransmetteurs catécholaminergiques (par ex. la dopamine), impliqués dans le fonctionnement des nombreuses zones cérébrales, dont le cortex préfrontal mais aussi par un effet anti-inflammatoire bénéfique à la cognition (via l'Interleukine-6 et l'Interleukine-1). Par ailleurs, l'activation répétée et régulière, par la pratique d'activité physique, de l'axe HPA (hypothalamo-hypophyso-surrénalien), impliqué dans la réponse au stress, diminuerait la sensibilité aux hormones libérées (i.e., corticoréline et adrénocorticotrope) lorsque l'individu est face à un agent stressant (pour revue, voir Stranahan et al., 2008).

3.2.4.2.2. MODIFICATIONS CÉRÉBRALES

Ces différents changements moléculaires et cellulaires peuvent favoriser la plasticité cérébrale. En effet, chez les adultes âgés, la pratique d'activité physique semble ralentir les changements structuraux (Bugg & Head, 2011; Colcombe et al., 2003, 2006; Colcombe et al., 2004; Erickson et al., 2009, 2011) et fonctionnels (Albinet et al., 2014; Colcombe et al., 2004; Hyodo et al., 2016) liés au vieillissement cérébral (pour revues voir Erickson et al., 2013; Voelcker-Rehage & Niemann, 2013). Ces effets bénéfiques sont observés dans les zones impliquées dans les processus mnésiques, au niveau préfrontal (Colcombe et al., 2006; Ruscheweyh et al., 2011) comme hippocampique (Erickson et al., 2011) et peuvent donc influencer les performances exécutives et mnésiques (Erickson et al., 2009, 2011; Maass et al., 2015; Weinstein et al., 2012).

La préservation de l'intégrité hémodynamique de certaines zones cérébrales (Ainslie et al., 2008; Salzman et al., 2022) peut également être liée aux bénéfices de l'activité physique sur la cognition (Chapman et al., 2013; Chodzko-Zajko et al., 1992; Colcombe et al., 2004; Dupuy et al., 2015; Kramer et al., 1999; Prakash et al., 2011 mais voir Etnier et al., 2006 pour une méta-analyse ne soutenant pas ce lien). Ainsi, l'amélioration de la vascularisation cérébrale favoriserait le métabolisme nécessaire à un fonctionnement optimal des circuits neuronaux, en permettant une amélioration du transport d'oxygène et de glucose notamment dans les régions les plus vulnérables aux changements liés à l'âge (par ex. cortex préfrontal).

3.2.4.2.3. MODIFICATIONS COMPORTEMENTALES

Des changements comportementaux et socio-émotionnels – tels que le stress, l'humeur, le sommeil, la motivation ou encore le sentiment d'efficacité – pourraient être impliqués dans les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire. Cependant, bien que les effets positifs de l'activité physique sur ces variables (Netz et al., 2005; Sarid et al., 2010; Yang et al., 2012) et les effets positifs de ces variables sur la mémoire aient déjà été étudiés (Aly & Moscovitch, 2010; Yochim et al., 2013), peu d'études placent directement ces facteurs comme médiateurs de la relation entre activité physique et mémoire (Wilckens et al., 2018 pour un exemple sur le sommeil). L'activité physique permettrait également de favoriser les activités cognitives et les contacts sociaux, eux aussi bénéfiques pour la mémoire (Robitaille et al., 2014).

3.2.4.3. BOUCLES RÉTROACTIVES : UN CERCLE VERTUEUX

De nombreuses études semblent également soutenir l'existence d'un lien bidirectionnel entre fonctions exécutives et activité physique (voir Audiffren & André, 2019 pour une revue), voire entre fonctions exécutives et comportements bénéfiques pour la santé de manière plus générale (Allan et al., 2016; Hall & Fong, 2015). Plus précisément, les liens entre fonctions exécutives et

activité physique prendraient la forme d'un cercle vertueux. L'activité physique est bénéfique pour les fonctions exécutives (Albinet et al., 2010; Frederiksen et al., 2015; Voelcker-Rehage et al., 2010). Un fonctionnement exécutif efficient permet également l'adhérence à une activité physique en favorisant la pratique régulière et en limitant les comportements néfastes pour la santé (André et al., 2018; Best et al., 2014; Cheval et al., 2018; Daly et al., 2015 et voir Gürdere et al., 2023 pour une méta-analyse récente).

De la même façon, d'après le modèle théorique proposé par Ponce et Loprinzi (2018) (voir **Figure 3**), l'activité physique pourrait être bénéfique pour la mémoire épisodique sur un court-terme (i.e., activité physique aiguë, flèches bleues) mais aussi sur un plus long terme (i.e., activité physique chronique, flèche orange) notamment grâce à son effet sur la réserve cognitive et cérébrale décrite précédemment. Cependant, la mémoire permettrait également de maintenir une activité physique, les expériences passées positives (affects, excitation) en lien avec l'activité physique servant de motivation à s'engager dans de futures activités physiques (flèche verte). Enfin, les processus mnésiques comme l'activité physique suivraient une continuité temporelle (flèches jaunes). Plus précisément, les capacités mnésiques mesurées à une *baseline* (par ex. jeune âge) prédiraient les performances mnésiques futures (par ex. âge adulte). De la même façon, l'activité physique pratiquée à une *baseline* (par ex. jeune âge) prédiraient l'activité physique future (par ex. âge adulte). En d'autres termes, la pratique d'activité physique et les performances mnésiques suivent une trajectoire continue entre deux périodes de vie. Cette continuité peut néanmoins être influencée par des facteurs extérieurs, incluant des aspects socio-démographiques, de santé ou psychologiques.

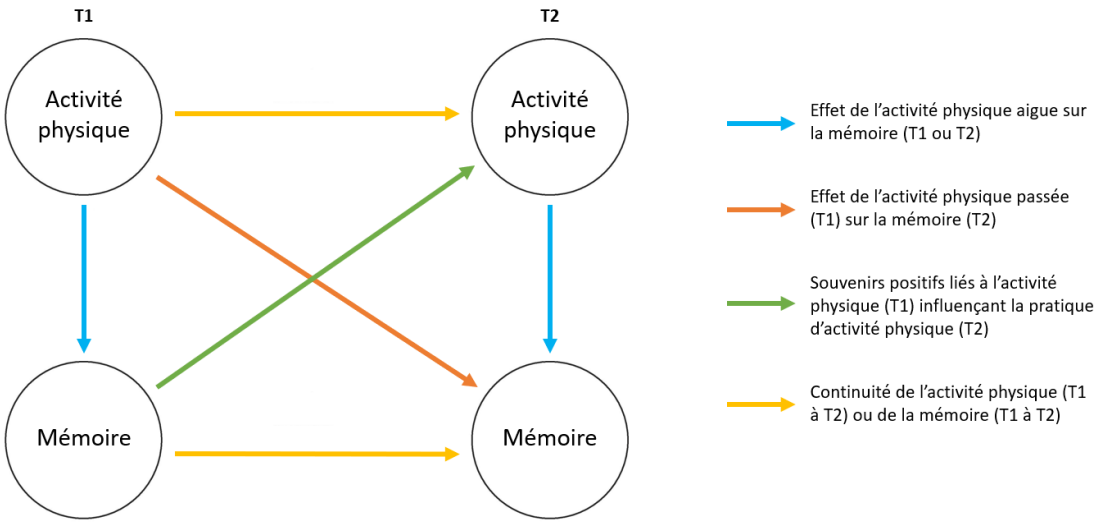


Figure 3. Modèle bidirectionnel entre mémoire et activité physique, inspiré de Ponce et Loprinzi (2018)

Points importants – Chapitre 1

- **Effets d'âge sur la mémoire : implication des fonctions exécutives**

Les effets du vieillissement sur la mémoire épisodique (i.e., système permettant la récupération d'une information et de son contexte d'apprentissage) peuvent être expliqués par une diminution des capacités exécutives, nécessaires à la mise en place de stratégies auto-initiées.

- **Facteurs protecteurs des effets de l'âge sur la mémoire**

De nombreuses variabilités intra- et inter-individuelles sont observées quant à la diminution des performances cognitives au cours du vieillissement. Ces différences sont théorisées par le concept de réserve, c'est-à-dire les mécanismes cérébraux et/ou les processus cognitifs, influencés par différents facteurs génétiques et environnementaux permettant de faire face aux effets du vieillissement.

- **Importance des fonctions exécutives dans les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire**

L'activité physique, un des facteurs majeurs de réserve, permet de préserver les capacités mnésiques des adultes âgés et de nombreux facteurs explicatifs ont été proposés. Parmi ces facteurs, l'implication des fonctions exécutives n'est que succinctement évoquée malgré son importance dans les processus mnésiques.

Chapitre 2

IMPORTANCE DE LA MOTRICITÉ ET DE L'ENVIRONNEMENT SOCIAL : APPROCHE INCARNÉE ET SITUÉE DE LA COGNITION

Bien que les effets du vieillissement sur la mémoire soient depuis de nombreuses années étudiés dans une perspective cognitiviste (par ex. Balota et al., 2000; Luo & Craik, 2008; Nilsson, 2003; Wang et al., 2017; Zacks et al., 2000), l'évolution du concept de trace mnésique amène à questionner et étudier différemment les modifications mnésiques liées à l'âge. En effet, selon l'approche incarnée et située, les traces mnésiques dépendent des expériences sensorimotrices mais également de l'interaction entre le corps et l'environnement (physique, social, culturel). Considérer les traces mnésiques comme modales (i.e., liées aux sens) implique que les modifications observées ne seraient peut-être pas uniquement liées à des processus généraux (par ex. fonctions exécutives, West, 1996, 2000, vitesse de traitement, Salthouse, 1996) mais pourraient également être observables à un niveau plus qualitatif, c'est-à-dire au niveau de la richesse sensorimotrice de la trace mnésique elle-même. Par ailleurs, étudier les changements mnésiques en lien avec le corps (i.e., modifications physiques) et l'environnement (i.e., modifications sociales, représentation dans la société) permettrait également une approche plus écologique et holistique du vieillissement (i.e., aspects physiques, sociaux, cognitifs considérés simultanément, et non plus comme des changements distincts).

1. DES TRACES MNÉSIQUES MODALES

En considérant les traces mnésiques comme modales, les liens entre perception et mémoire peuvent être envisagés comme horizontaux : les deux processus porteraient, au moins en partie, sur des éléments sensorimoteurs communs, qui peuvent être perceptivement présents (i.e., perception) ou absents (i.e., mémoire). Ainsi, la perception influence la récupération d'un souvenir en mémoire et les traces mnésiques présentes en mémoire influencent la perception. Les approches incarnées et situées s'appuient sur les propriétés biologiques du support de la mémoire, le cerveau, afin de comprendre le fonctionnement des processus cognitifs. Autrement dit, les modèles de mémoire issus de ce courant prennent en considération les modifications continues (i.e., mécanisme de plasticité, liaisons plus ou moins renforcées) des différentes zones neuronales lors des expériences sensorimotrices. Ces dernières jouent un rôle primordial dans la

construction du cerveau, expliquant les variabilités anatomiques comme comportementales. En effet, l'histoire d'un individu détermine les traces mnésiques émergentes dans une situation présente mais cette situation présente peut également modifier les traces passées. La mémoire – par sa capacité à encoder, stocker et récupérer une information – permettrait de produire ou anticiper des comportements ou des situations à partir des expériences passées se rapprochant de l'expérience passée. Cette définition implique que toutes les expériences passées seraient conservées en mémoire, et particulièrement leurs propriétés sensorimotrices, ce qui signifie que les traces sont multidimensionnelles.

Les spécificités du courant incarné et situé de la cognition ont permis une évolution des modèles décrivant le fonctionnement de la mémoire. Ainsi, dans le modèle Act-In (Versace et al., 2014, **Figure 4**), les traces en mémoire reflètent les différentes composantes sensorielles captées par les récepteurs sensoriels, les actions faites sur l'environnement et les états émotionnels vécus. Ces traces sont distribuées dans de nombreux systèmes neuronaux reflétant ces composantes sensorimotrices. La récupération se fait par l'activation des différentes traces mnésiques passées partageant des traits sensorimoteurs communs avec la situation actuelle. Puis, les traces mnésiques ou les composantes sensorimotrices activées sont intégrées en une connaissance unique. Les connaissances émergentes correspondent à un couplage entre l'expérience présente et les expériences passées. En d'autres termes, la création de nouvelles traces dépend des traces passées émergentes et les traces passées sont modifiées par cette nouvelle trace.

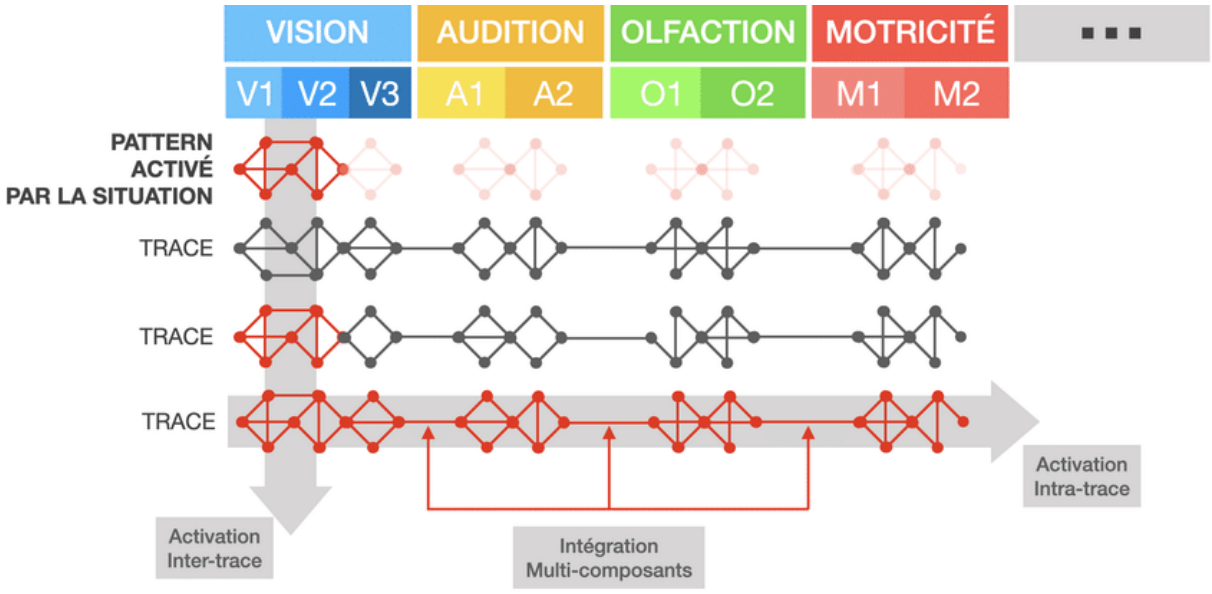


Figure 4. Modèle Act-In de la mémoire proposé par Versace et al. (2014)

Ce modèle peut être représenté sous forme de matrice (**Figure 4**) dans laquelle une colonne correspond à une composante sensorimotrice (vision, audition, etc.) et une ligne correspond à

une trace mnésique, la première ligne correspondant à la situation présente et les suivantes aux expériences passées. Bien que la matrice représente les traces de façon séparée, ces traces et leurs composantes ne correspondent pas à un stockage distinct. La récupération d'une trace ou d'un souvenir fait intervenir trois mécanismes en parallèle : l'activation « inter-traces », l'activation « intra-traces » et l'intégration multi-composants.

L'activation « inter-traces » permet de diffuser une activation vers et/ou entre les différentes traces à partir du pattern présent, c'est-à-dire que l'activation d'un pattern visuel (par ex. vision d'un chat) devrait activer l'ensemble des traces où un pattern similaire a été visuellement perçu (i.e., autres situations où un chat a été vu). L'activation « intra-traces » permet l'activation des autres composantes sensorimotrices associées à un pattern d'activation d'une composante particulière, c'est-à-dire que l'activation d'un pattern visuel (par ex. vision d'un chat) devrait activer les autres composantes sensorimotrices telles que l'odorat (par ex. nourriture pour chat) ou le toucher (par ex. poils doux d'un chat) (appelée « inter-modales » quand elle se fait plus largement que sur une trace unique). Ces processus d'activation, qui se déroulent simultanément, sont illustrés dans les études réalisées par Brunel et collaborateurs (2009, 2010). Par exemple, dans l'étude de Brunel et al. (2009), une trace mnésique était créée par catégorisation de formes (40 cercles *vs.* 40 carrés), présentées aléatoirement durant 500ms. L'une des deux formes est systématiquement associé à un bruit blanc. Dans un second temps, les formes étaient présentées de nouveau (durant 100ms *vs.* 500ms), suivies d'un son que les participants devaient catégoriser (grave *vs.* aigu). Si les processus d'activation sont à la base des traces mnésiques, alors la présence de la forme avant le son à catégoriser (grave *vs.* aigu) devrait réactiver le bruit blanc associé et gêner la catégorisation du son grave ou aigu présenté. Par exemple, dans le cas où le carré a été systématiquement encodé avec un bruit blanc, présenter un carré avant une tâche de catégorisation d'un son grave ou aigu devrait perturber cette catégorisation puisque le bruit blanc émerge en mémoire avec la forme carré. Dans cette seconde phase, la réponse des participants a été perturbée uniquement lorsque la forme préalablement associée au bruit blanc est présentée durant 100ms, c'est-à-dire dans un temps plus court que le son mémorisé dans la première phase (500ms). Les auteurs suggèrent qu'il y aurait un chevauchement entre les processus mnésiques (i.e., bruit blanc recréé) et les processus perceptifs (i.e., son grave ou aigu entendu), lié aux mécanismes d'activations.

Enfin, l'intégration multi-composants permettrait de constituer des connaissances, épisodiques comme sémantiques, unitaires et élaborées à partir des patterns ou propriétés ayant émergé. Ce

dernier mécanisme est décrit comme dynamique, progressif et non linéaire (i.e., ne correspond pas à la simple somme des différentes propriétés).

Ainsi, l'approche incarnée et située considère l'existence d'un seul et unique système de mémoire à long terme duquel émergeraient les connaissances sémantiques et épisodiques selon un continuum renvoyant à la quantité de traces réactivées. Lorsque peu de traces sont réactivées, les connaissances sont spécifiques (i.e., épisodiques). La réactivation d'un grand nombre de traces permet la construction de connaissances conceptuelles (i.e., sémantiques). Plus précisément, le poids des mécanismes d'activation décrits précédemment influence la quantité de traces réactivées. Une activation « inter-traces » importante, associée à une activation « inter-modales » non spécifique reflète les caractéristiques sensorimotrices rencontrées fréquemment pour une même situation ou un même objet (i.e., connaissances conceptuelles). Au contraire, une activation « inter-traces » relativement faible, associée à une activation « intra-trace » spécifique à une trace particulière reflète les composantes sensorimotrices d'un même souvenir (i.e., épisodiques).

Dans ce contexte, la mémoire est vue comme un processus dynamique. En effet, l'encodage comme la récupération sont liés à la perception que l'individu a de la situation présente. L'encodage d'une nouvelle trace mnésique dépend des éléments perceptifs perçus et intégrés. La récupération ou l'émergence d'un souvenir apparaissent à partir des traits sensorimoteurs perçus. Le contexte environnemental de la situation actuelle joue donc un rôle particulièrement important dans les processus mnésiques.

2. INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SOCIAL SUR LES PERFORMANCES MNÉSIQUES ET LES EXPÉRIENCES MOTRICES

Depuis quelques années, les recherches en cognition sociale nuancent la vision « inéluctable » du vieillissement en plaçant les représentations sociales et culturelles, tels que les stéréotypes, comme des facteurs capables d'influencer les capacités individuelles (Steele & Aronson, 1995).

2.1. STÉRÉOTYPES ET MENACE DU STÉRÉOTYPE

Les stéréotypes correspondent à des connaissances ou des représentations généralisées positives comme négatives sur des caractéristiques communes aux membres d'un même groupe social. Ils facilitent la compréhension de l'environnement. Par exemple, les stéréotypes sont des connaissances permettant de traiter plus rapidement la quantité importante d'information

présente dans l'environnement. Cependant, cette généralisation ne permet pas toujours de prendre en compte les différences inter-individuelles (i.e., tous les membres du groupe sont considérés comme identiques). Par ailleurs, les stéréotypes sont internalisés depuis l'enfance (notamment par le cercle familial ou la culture) puis renforcés par leur exposition répétée dans la société. Cette exposition répétée explique la prégnance des stéréotypes chez les adultes âgés, pour qui ces stéréotypes peuvent devenir des auto-stéréotypes (Levy, 2003).

La présence de stéréotypes négatifs sur un groupe social peut devenir menaçant pour les personnes concernées lorsqu'ils induisent un changement de comportement. Ces situations font référence à la menace du stéréotype, étudiée pour la première fois par Steele et Aronson (1995). La menace du stéréotype apparaît lorsque la personne ressent appartenir à un groupe, en ayant connaissance des stéréotypes sur ce groupe et est donc considérée comme situationnelle (« *threat in the air* » tel que nommé par Steele, 1997). En d'autres termes, la situation doit présenter un risque de confirmer le stéréotype pour que la menace apparaisse. Lorsque l'on souhaite évaluer l'effet de la menace du stéréotype lié au vieillissement sur la mémoire en contexte de laboratoire, il est possible d'activer les stéréotypes de différentes façons pour constituer des conditions de « menace du stéréotype ». Lors d'une activation explicite du stéréotype, des faits sur les moins bonnes performances des adultes âgés sont par exemple présentés avant l'évaluation (par ex. lecture d'articles scientifiques informant des effets délétères de l'âge sur la mémoire, Hess et al., 2003; Wong & Gallo, 2019). Lors d'une activation implicite, les consignes précisent l'évaluation d'une capacité visée par les stéréotypes (par ex. « nous allons tester votre mémoire », (Bouazzaoui et al., 2016, 2020; Chasteen et al., 2005; Desrichard & Köpetz, 2005; Hess et al., 2003; Mazerolle et al., 2015; Rahhal et al., 2001) ou la comparaison avec des adultes plus jeunes (par exemple, « nous allons comparer votre mémoire à celle de personnes plus jeunes », Hess et al., 2003; Mazerolle et al., 2012, 2015; Swift et al., 2012).

Concernant les adultes âgés, les stéréotypes sont nombreux et multidimensionnels puisqu'ils traitent à la fois d'aspects positifs (par ex. sage, sociable, généreux) et d'aspects négatifs (Schmidt & Boland, 1986). Les stéréotypes négatifs concernent notamment les capacités cognitives, dont mnésiques (par ex. « les adultes âgés perdent la mémoire »), et les capacités physiques (par ex. « les adultes âgés sont plus lents »). Les stéréotypes négatifs portés par la société présentent les adultes âgés comme moins performants que les plus jeunes (voir Hummert, 2011). Ils peuvent modifier les capacités mnésiques et physiques réelles des adultes âgés visés par ces stéréotypes, d'autant plus que ces stéréotypes sont extrêmement présents et visibles dans la société (par ex. Levy et al., 2014 pour les réseaux sociaux). Ainsi, les performances aux tests

mnésiques et moteurs chez les adultes âgés pourraient en partie être liées à l'internalisation depuis l'enfance de ces stéréotypes négatifs. Bien que les effets des stéréotypes sur les capacités cognitives et motrices soient particulièrement étudiés chez les adultes âgés, pour qui les inquiétudes sur l'intégrité de ces capacités sont plus importantes, de récentes études montrent que les stéréotypes sur le vieillissement influencent les adultes jeunes lorsque ces derniers sont placés en situation de vieillissement fictif par une procédure impliquant la réalité virtuelle.

2.2. STÉRÉOTYPES SUR LE VIEILLISSEMENT : QUELS EFFETS SUR LES PERSONNES ÂGÉES ?

Les effets de la menace du stéréotype dans le vieillissement ont été explorés sur différentes capacités cognitives, en particulier la mémoire (Bouazzaoui et al., 2016; Mazerolle et al., 2012), sensorimotrices (Barber et al., 2020) et physiologiques (par ex. cardiovasculaire, Weiss, 2016) mais aussi sur des variables psychoaffectives (par ex. volonté de vivre, Levy et al., 2000) (voir Armstrong et al., 2017; Lamont et al., 2015 pour des méta-analyses). *In fine*, la menace du stéréotype illustre la malléabilité des capacités et/ou des comportements des adultes âgés en fonction du contexte dans lesquels ils sont évalués. En d'autres termes, l'environnement social jouerait une importance majeure dans les comportements d'un individu. La méta-analyse de Lamont et al. (2015) précise que cet effet de menace existant chez les adultes âgés est de taille faible à modérée (*Cohen's d* = .28) et diffère selon que l'on s'intéresse à des tâches cognitives (*Cohen's d* = 0.35, 46 études) ou motrices (*Cohen's d* = 0.19, 3 études)[6]. De plus, les mécanismes qui sous-tendent l'effet de menace du stéréotype sont multiples (Gauthier et al., 2020; Gautier et al., 2022) et pourraient également dépendre du domaine d'intérêt (cognitif *vs.* moteur), de la manipulation du stéréotype (explicite *vs.* implicite) mais aussi de la tâche utilisée (considérée comme facile, automatique *vs.* difficile, reposant sur des processus contrôlés).

2.2.1. STÉRÉOTYPES SUR LE VIEILLISSEMENT : EFFETS SUR LES PERFORMANCES MNÉSIQUES

Les études tendent à montrer que l'activation des stéréotypes négatifs sur le vieillissement modifient les performances mnésiques. En effet, un nombre grandissant d'études confirme que les performances mnésiques des adultes âgés mis en condition de menace du stéréotype sont significativement moins élevées que celles d'adultes âgés pour qui les stéréotypes ne sont pas activés. Par exemple, Bouazzaoui et al. (2020) ont réalisé une étude comparant les performances mnésiques (rappel immédiat et différé de deux histoires, Test de Mémoire Logique, Wechsler,

[6] Un *d* de Cohen autour de 0.2 décrit un effet « faible », autour de 0.5 un effet « moyen » et autour de 0.8 un effet « fort »

1945) d'adultes âgés mis ou non en situation de menace du stéréotype (indications sur l'évaluation de la mémoire vs. sur l'évaluation de la compréhension des histoires). Les performances mnésiques des adultes âgés en situation de menace du stéréotype sont significativement moins élevées que ceux pour qui la menace n'est pas activée, différence plus importante en rappel différé qu'en rappel immédiat (voir aussi Bouazzaoui et al., 2016; Desrichard & Köpetz, 2005; Eich et al., 2014; Hess, Emery, et al., 2009; Hess et al., 2003; Hess & Hinson, 2006; Mazerolle et al., 2012, 2015; Rahhal et al., 2001; Stein et al., 2002 et voir Armstrong et al., 2017 pour une méta-analyse récente). En plus des effets observés sur les performances de mémoire, les représentations sur son propre fonctionnement mnésique (efficacité et plaintes, mesurées à l'aide du *Metamemory in Adulthood*, Dixon et al., 1988) sont également modifiées lorsque les stéréotypes sont activés, altérant les performances mnésiques réelles des adultes âgés en situation de menace (Bouazzaoui et al., 2016, 2020), bien que les deux groupes d'adultes âgés menacés et non menacés indiquent percevoir leur fonctionnement mnésique comme équivalent avant l'activation des stéréotypes.

Cet effet de menace du stéréotype sur les performances cognitives serait différent en fonction de l'âge des adultes âgés, leur niveau d'étude mais également la vision de leur propre vieillissement. En effet, les adultes âgés les plus jeunes (Eich et al., 2014; Hess, Hinson, et al., 2009; Hess & Hinson, 2006) et ceux ayant un haut niveau d'étude (Gilet et al., 2021; Hess, Hinson, et al., 2009; Smith et al., 2017) seraient les plus sensibles à la menace. De plus, une vision négative de son propre vieillissement ou de ses propres capacités mnésiques accentue également l'effet de menace du stéréotype (Fresson et al., 2017; Kalenzaga et al., 2019). A l'inverse, les adultes âgés les moins affectés par la menace du stéréotype sont ceux ayant une perception de leur vieillissement positive (Fernández-Ballesteros et al., 2015).

Différentes hypothèses explicatives des effets de la menace du stéréotype sur les capacités mnésiques ont été proposées (voir **Table 2** pour un résumé des hypothèses majeures et Barber, 2017; Gauthier et al., 2020; Mazerolle et al., 2021 pour des revues).

Parmi ces hypothèses, la diminution du contrôle cognitif a été largement étudiée (hypothèse de l'interférence exécutive, Schmader et al., 2008). Dans le cadre du vieillissement, de nombreuses études suggèrent que la menace du stéréotype induit une surcharge de la mémoire de travail, conduisant à une diminution de l'utilisation des stratégies contrôlées au profit de processus plus automatiques (Eich et al., 2014; Hess, Emery, et al., 2009; Hess et al., 2003; Mazerolle et al., 2012; Thomas & Dubois, 2011). Par exemple, dans l'étude de Eich et al. (2014), la menace du stéréotype altère les performances des adultes âgés uniquement lorsque la tâche de mémoire

(rappel indicé par trigrammes) est explicite et nécessite des processus contrôlés à la récupération (i.e., compléter les trigrammes avec un vu précédemment) mais n'a aucun effet sur les performances obtenues lors d'une tâche de mémoire plus automatique (i.e., compléter les trigrammes avec le premier mot qui vient à l'esprit).

Table 2. Hypothèses explicatives des effets de la menace du stéréotype sur les capacités mnésiques

Hypothèse	Explication
Hypothèse de l'interférence exécutive (Schmader et al., 2008)	La menace du stéréotype induit une diminution des ressources exécutives disponibles. Cette diminution peut être liée à une augmentation : (1) du stress, notamment physiologique, (2) du monitoring (ou surveillance) de la tâche en cours et (3) des mécanismes nécessaires à la suppression des pensées intrusives et de l'anxiété
Hypothèse de l'augmentation de l'effort (Harkins, 2006)	La menace du stéréotype induit une augmentation de la motivation à infirmer les stéréotypes négatifs, amenant la production de plus de réponses dominantes et automatiques
Hypothèse du focus de régulation (Seibt & Förster, 2004)	La menace du stéréotype induit une utilisation d'un focus de prévention (*vs.* focus de promotion) permettant de limiter les erreurs (au détriment de la vitesse de traitement de l'information)

Les processus affectifs (i.e., suppression des pensées intrusives, des émotions négatives et de l'anxiété), physiologiques (i.e., stress) mais également cognitifs (i.e., *monitoring* ou surveillance de la tâche) induits par la menace du stéréotype peuvent expliquer l'interférence exécutive. En ce sens, Bouazzaoui et al. (2020) ont réalisé une étude évaluant l'importance du contrôle mnésique (i.e., le sentiment de contrôle que les personnes disent avoir sur leur mémoire , par ex. « ma mémoire ne diminuera pas si je la fais travailler ») et de l'anxiété (évalués par le *Metamemory in Adulthood,* Dixon et al., 1988) dans l'effet de menace du stéréotype. Les résultats indiquent que les deux facteurs pourraient jouer un rôle puisque l'anxiété et le contrôle interagissent de manière différente en fonction de la menace (non menacé *vs.* menacé). Dans le groupe d'adultes âgés « non menacés », les processus de contrôle expliquent les performances mnésiques uniquement chez les adultes âgés ayant un faible niveau d'anxiété. En revanche, dans le groupe d'adultes âgés « menacés », les processus de contrôle n'expliquent plus les performances mnésiques des adultes âgés, peu importe leur niveau d'anxiété. Les auteurs suggèrent que l'activation des stéréotypes diminue le recours aux processus de contrôle chez les adultes âgés ayant un faible niveau d'anxiété. L'implication des processus de contrôle dans les performances mnésiques ne varie donc plus en fonction du niveau d'anxiété des adultes âgés lors d'une situation de menace du stéréotype.

Certaines études ne confirment pas l'implication des processus de contrôle mnésique ni de l'anxiété dans la menace du stéréotype (Hess et al., 2009), suggérant l'existence d'autres mécanismes (d'autant plus que la régulation émotionnelle serait plus coûteuse cognitivement chez les adultes jeunes que chez les âgés, Popham & Hess, 2015). Ainsi, deux autres hypothèses, pouvant être complémentaires à l'hypothèse d'interférence exécutive et impliquant des aspects motivationnels, ont été proposées pour expliquer les effets des stéréotypes sur les performances cognitives.

La première, l'hypothèse de l'augmentation de l'effort (proposée par Harkins, 2006), suggère une augmentation de la motivation en situation de menace du stéréotype, dans le but d'infirmer les stéréotypes existants sur le groupe social d'appartenance. En conséquence, l'individu favoriserait les réponses dominantes et automatiques pour répondre à la tâche demandée. Par exemple, lors d'une tâche de mémoire (rappel indicé), l'activation de stéréotypes négatifs sur le vieillissement a modifié l'utilisation des processus contrôlés et liés à la familiarité chez les adultes âgés. Les processus contrôlés de récupération étaient moins utilisés, soutenant l'hypothèse d'interférence exécutive mentionnée précédemment. Les processus liés à la familiarité, plus automatiques, étaient davantage utilisés, soutenant l'hypothèse d'augmentation de l'effort (Mazerolle et al., 2012). Ces résultats ont également été observés avec un protocole basé sur l'utilisation du paradigme *Remember/Know*, basé sur une tâche de reconnaissance où le participant doit indiquer, lorsqu'il reconnaît le mot présenté, si la reconnaissance implique une remémoration contrôlé nécessitant la récupération du contexte d'apprentissage (réponses *Remember*) ou si la reconnaissance est basée sur la familiarité (réponses *Know*) (Tulving, 1985). Les résultats montrent que la menace du stéréotype a diminué l'utilisation des réponses *Remember* (hypothèse d'interférence exécutive) et a augmenté l'utilisation des réponses *Know* (hypothèse d'augmentation de l'effort) des adultes âgés (Mazerolle et al., 2015).

Toujours concernant des aspects motivationnels, l'hypothèse du focus de régulation (Seibt & Förster, 2004) suggère que la situation de menace du stéréotype favoriserait l'utilisation d'un focus de prévention (i.e., augmentation de la vigilance pour éviter les erreurs) lors de réalisation d'une tâche (voir Dorgnier et al., 2022 pour une revue sur cette hypothèse en lien avec les faux souvenirs). Barber et Mather (2013, Expérience 1) montrent, par exemple, que malgré une diminution des performances mnésiques (rappel libre) chez les adultes âgés en situation de menace du stéréotype, la proportion d'intrusions est moins importante chez ce groupe d'adultes âgés comparativement à ce qui est observé chez les adultes âgés qui ne sont pas en situation de menace. Ainsi, selon les consignes fournies, la menace du stéréotype peut également présenter

des bénéfices pour les capacités mnésiques, notamment sur des aspects qualitatifs, en limitant les erreurs par un focus de prévention.

2.2.2. STÉRÉOTYPES SUR LE VIEILLISSEMENT : EFFETS SUR LES PERFORMANCES MOTRICES

Quelques études se sont intéressées à l'effet de la menace du stéréotype sur les performances motrices d'adultes âgés. Par exemple, des participants âgés (M = 82.25 ans) ont été répartis en deux groupes, dont l'un recevait une consigne menaçante (comparaison avec des adultes jeunes) et l'autre non. L'ensemble des participants réalise ensuite une tâche de force de préhension qui consiste à serrer un dynamomètre manuel le plus fort possible. Les performances motrices (force et persistance de préhension) des adultes âgés mis en situation de menace sont significativement plus faibles que celles des adultes âgés du groupe contrôle (Swift et al., 2012, voir aussi Barber et al., 2020; Chiviacowsky et al., 2018). Cependant, d'autres études ne rapportent pas ces résultats. Parmi elles, Horton et al. (2010) ont comparé les performances à différentes mesures motrices (force de préhension, vitesse de marche sur 11.5 mètres, flexibilité du dos, des hanches et des ischio-jambiers) de trois groupes d'adultes âgés pour lesquels la manipulation des stéréotypes diffère (lecture d'articles négatifs, positifs ou aucune manipulation). Pour l'ensemble des mesures motrices, aucune différence significative n'est observée entre les groupes (voir aussi Deshayes et al., 2020; Hausdorff et al., 1999; Marquet et al., 2018; Moriello et al., 2013). Ainsi, bien que la menace du stéréotype sur les performances cognitives des adultes âgés semble être consensuelle, les effets de la menace du stéréotype sur la motricité semblent plus controversés (voir Lamont et al., 2015 pour une méta-analyse).

Certains auteurs suggèrent que la divergence des résultats peut s'expliquer par la diversité des niveaux de difficulté de la tâche motrice à réaliser (Barber et al., 2020a; Chalabaev et al., 2020; Deshayes et al., 2022). Plus précisément, la menace du stéréotype apparaît lorsque la situation présente un risque de confirmer le stéréotype. Ainsi, une tâche motrice facile, telle que marcher à une vitesse habituelle, ne permettrait pas de mettre en évidence les effets de menace du stéréotype, comparativement à une tâche plus difficile, telle que marcher à l'intérieur d'une zone d'appui étroite (Barber et al., 2020a). Dans la même idée, l'étude de Chalabaev et al. (2020) précise que même si la vitesse de marche habituelle n'est pas influencée par la menace du stéréotype, l'activation des stéréotypes induit toutefois une charge cognitive supplémentaire durant la marche (mesurée à l'aide d'une double tâche impliquant la marche et une tâche de Stroop). Deux hypothèses explicatives ont été proposées. Premièrement, l'activation des stéréotypes sur la marche chez les adultes âgés induit des pensées intrusives liées à la réussite de

cette tâche de marche, laissant moins de ressources cognitives disponibles pour la réalisation de la tâche du Stroop (en lien avec l'hypothèse de l'interférence exécutive). Deuxièmement, la menace du stéréotype induit l'utilisation de comportements plus automatiques, notamment lors de la tâche du Stroop (en lien avec l'hypothèse d'augmentation de l'effort).

Enfin, Levy et Leifheit-Limson (2009) montrent que les effets de menace du stéréotype sur les performances mnésiques et motrices chez les adultes âgés peuvent dépendre des stéréotypes activés (capacités mnésiques *vs.* motrices). Ainsi, les performances mnésiques des adultes âgés sont particulièrement affectées lorsque les stéréotypes activés sont en lien avec les capacités mnésiques de ce groupe d'âge. De la même façon, la diminution de performances motrices est plus importante lorsque les stéréotypes activés sont liés aux capacités physiques des adultes âgés. Ainsi, l'activation des stéréotypes dans les études portant sur les aspects moteurs pourrait également jouer un rôle dans la divergence des résultats de la littérature.

2.3. INFLUENCE DES REPRÉSENTATIONS SOCIALES SUR LE VIEILLISSEMENT CHEZ LES JEUNES ADULTES : DANS QUELLES CONDITIONS ?

La plupart des études impliquant l'activation de stéréotypes négatifs sur le vieillissement ne montrent pas d'effet de cette activation chez les adultes jeunes. Cependant, depuis quelques années, des études tendent à montrer un effet de ces stéréotypes lorsque les adultes jeunes sont mis en situation de vieillissement par un avatar (en réalité virtuelle ou lors de jeux non-immersifs). Cet effet a été désigné sous les termes « d'effet Proteus », en référence au dieu grec capable de métamorphose. Cet effet est défini comme l'ensemble des changements comportementaux ou d'attitudes résultant de l'utilisation d'un avatar et liés à des indices d'identité provenant de l'apparence de l'avatar. Cet effet a été étudié dans de nombreux domaines (voir Clark, 2020; Ratan et al., 2020 pour des méta-analyses récentes) : le genre (Lee et al., 2014), la couleur de peau (Groom et al., 2009; Peck et al., 2013), la corpulence (Dupraz et al., 2022; Kocur et al., 2020), les vêtements portés (Fox et al., 2013), la taille ou encore l'attirance (Yee et al., 2009; Yee & Bailenson, 2007). Toutefois, ces études sont récentes, les hypothèses explicatives de cet effet Proteus sont donc encore peu nombreuses et peu développées. Étant donné que l'intérêt de ce travail de thèse ne porte pas sur l'utilisation d'avatar, ces hypothèses ne seront pas détaillées ici, seuls les effets observés seront décrits afin de souligner l'importance et les répercussions que les représentations sur le vieillissement peuvent avoir sur le comportement d'adultes jeunes.

Dans les études sur l'utilisation d'avatars âgés, les chercheurs s'intéressent à des mesures telles que la motivation sociale (i.e., Vahle & Tomasik, 2022), les choix (i.e., magazines, Yoo, Peña, & Drumwright, 2015 ; moyens alloués à la retraite, Hershfield et al., 2011) ou encore la réduction des stéréotypes vis-à-vis des adultes âgés chez des adultes plus jeunes (Yee & Bailenson, 2006) (voir Tammy Lin & Wu, 2021 pour une étude décrivant les effets observés sur l'activité physique lorsque des adultes âgés utilisent des avatars jeunes). Les études restent néanmoins peu nombreuses concernant les capacités motrices (Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015) voire inexistantes pour les processus mnésiques. Par exemple, chez des adultes jeunes, Yoo et al. (2015) ont mis en évidence un temps de déplacement plus important dans un magasin virtuel lorsque l'avatar utilisé était plus âgé. Des résultats similaires ont été observés sur un déplacement réel suite à l'utilisation de réalité virtuelle. En effet, Reinhard et al. (2020) ont évalué, chez des adultes jeunes, la vitesse de marche dans un couloir (24 mètres) avant et après l'utilisation d'un avatar ayant une apparence jeune ou âgée en réalité virtuelle (durée d'environ 20 minutes). Bien que l'ensemble des participants ait une vitesse de marche équivalente avant l'utilisation des avatars, la vitesse de marche après l'usage de la réalité virtuelle sur cette même distance est significativement ralentie chez ceux ayant utilisé l'avatar « âgé » uniquement. Cette différence n'est pas observée dans la condition d'utilisation de l'avatar « jeune ». Cet effet était modéré par le sentiment d'appartenir à l'environnement virtuel, c'est-à-dire que l'effet Proteus était plus prononcé chez les participants ayant un fort sentiment d'être dans l'environnement virtuel.

À notre connaissance, une seule étude porte sur l'effet Proteus lors d'une tâche cognitive d'imagerie motrice (Beaudoin et al., 2020). Dans cette étude, les participants, utilisant un avatar « jeune » ou « âgé », devaient imaginer se lever d'un siège, marcher le long d'un couloir et s'asseoir sur une autre chaise virtuelle éloignée. Les résultats montrent que les participants mettent plus de temps à réaliser la tâche d'imagerie motrice lorsqu'ils utilisent un avatar « âgé » plutôt qu'un avatar « jeune ». Enfin, plus les représentations du participant sur l'activité motrice des personnes âgées étaient négatives (mesurées à l'aide du *General Beliefs about Physical Functioning Instrument*[7], Lineweaver et al., 2018), plus l'effet de l'avatar « âgé » sur la performance d'imagerie motrice était important.

Malgré les stéréotypes négatifs existant sur les performances cognitives, et plus particulièrement mnésiques, des adultes âgés, aucune autre étude ne porte sur l'effet de ces stéréotypes sur les performances d'adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif.

[7] Questionnaire permettant d'évaluer les représentations concernant la force physique, la vitesse de déplacement, la capacité d'équilibre et de souplesse d'une personne adulte à 20 ans, 30 ans, 40 ans, 50 ans, 60 ans, 70 ans, 80 ans, et 90 ans.

puf
DANS L'ANNÉE PSYCHOLOGIQUE
ÉDITIONS PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

3. ÉTUDIER LE VIEILLISSEMENT MNÉSIQUE D'UN POINT DE VUE INCARNÉ : RÉFLEXIONS SUR L'APPORT DES SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT[8]

Résumé

Des combinaisons permettant de reproduire les changements sensorimoteurs liés au vieillissement ont été créées afin de mieux comprendre les difficultés rencontrées par les personnes âgées. Ces outils pourraient avoir un intérêt dans l'étude des processus cognitifs vieillissants. Selon les théories incarnées de la cognition, les déclins sensorimoteurs et cognitifs au cours du vieillissement pourraient être liés. Cette note méthodologique (1) décrit les équipements des simulateurs destinés à mimer les déclins sensorimoteurs liés au vieillissement, (2) explore l'idée selon laquelle le port d'un simulateur pourrait conduire à des modifications cognitives chez des individus jeunes se rapprochant du vieillissement cognitif, et (3) souligne les éléments manquants et les facteurs à prendre en compte pour développer de futures études utilisant ces simulateurs. Étudier les liens incarnés entre vieillissement sensorimoteur et cognitif à l'aide de ces outils pourrait étayer nos connaissances sur le vieillissement afin de mieux accompagner les individus.

Le vieillissement est marqué par des déclins sensorimoteurs affectant de nombreux domaines de la vie quotidienne (déplacements, utilisation d'objets quotidiens, transports, etc.). Pour mieux étudier le vieillissement, et dans le but d'améliorer la qualité de vie des individus vieillissants, de nouveaux outils permettant de reproduire ces déclins sensorimoteurs ont vu le jour, appelés simulateurs de vieillissement. Ces simulateurs sont alors utilisés chez des individus plus jeunes pour permettre une meilleure compréhension de ce que vivent les personnes âgées au quotidien. Les recherches utilisant ces outils innovants se sont, jusqu'à présent, concentrées sur

[8] Cette partie a fait l'objet d'une publication dans la revue *L'Année Psychologique* , seuls les numéros des figures ont été modifiés afin de conserver une cohérence dans l'ensemble du manuscrit. Les références bibliographiques peuvent être retrouvées à la fin du manuscrit.

Moutoussamy I., Taconnat L., Villatte J., Toussaint L., Pothier K. (accepté) Etudier le vieillissement mnésique d'un point de vue incarné : réflexions sur l'apport des simulateurs de vieillissement. L'Année Psychologique

l'aménagement de l'environnement des personnes âgées (comme la voiture ; Frison et al., 2018) ou sur les représentations du vieillissement (par ex. Lavallière et al., 2017), en particulier chez le personnel médical, dans le but d'améliorer l'empathie et la prise en charge des patients âgés (par ex. Bowden et al., 2020; Cheng et al., 2020; Hsu et al., 2016; Jeong & Kwon, 2021; Lee & Teh, 2020; Ono et al., 2017; Sari et al., 2020). De plus en plus d'auteurs suggèrent que la cognition prend racine dans les expériences sensorimotrices, à travers l'interaction du corps avec l'environnement (Barsalou, 2008). Ces théories sont particulièrement intéressantes pour la compréhension du vieillissement. En effet, les personnes âgées sont confrontées à certains déclins, tant sensoriels et moteurs que cognitifs, pouvant être liés (Roberts & Allen, 2016). Les connaissances sur le vieillissement cognitif, notamment les liens entre sensorimotricité et cognition, pourraient alors être approfondies à l'aide d'approches incarnées et situées de la cognition et de nouveaux protocoles de recherche utilisant un simulateur de vieillissement.

L'objectif de cette note méthodologique est d'apporter un éclairage sur le simulateur de vieillissement en tant que nouvelle technique de perturbation sensorimotrice permettant l'étude des liens entre sensorimotricité et cognition au cours du vieillissement. Pour cela, nous commencerons par décrire les simulateurs de vieillissement et comment ces derniers rendent compte des changements sensoriels et moteurs qui surviennent avec l'âge chez des individus plus jeunes. Enfin, les contributions des simulateurs de vieillissement dans la compréhension des liens entre sensorimotricité et mémoire au cours du vieillissement seront discutées.

3.1. LES SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT : REPRODUIRE LES DÉCLINS SENSORI-MOTEURS LIÉS À L'ÂGE

Les dispositifs simulant le vieillissement sont de plus en plus nombreux mais tous ont le même objectif de mimer au mieux les changements sensorimoteurs liés à l'avancée en âge : *Gerontological Test Suit* (GERT), the *Aged Simulation Set LM-060*, *Age Gain Now Empathy System* (AGNES), *Genworth R70i* ou encore *Sakamoto Model M176* pour une liste non exhaustive des simulateurs les plus utilisés dans les protocoles de recherche (voir **Figure 5** pour une illustration de ces simulateurs). Les changements liés à l'avancée en âge affecteraient les cinq principaux sens (ouïe, vue, toucher, goût et odorat), les habilités motrices mais également les capacités proprioceptives des personnes âgées. Ces différents changements sensorimoteurs sont présentés ci-après. Il est nécessaire de noter que ces altérations ont lieu conjointement pour un grand nombre de personnes âgées. En effet, Correia et al. (2016) ont mis en évidence, sur 1

301 répondants (âgés entre 57 et 85 ans), que seuls 5.9% n'avaient aucune altération sensorielle, 27.6% n'en avait qu'une seule alors que 66.5% en ont deux voire plus.



Figure 5. Illustration de quelques modèles de simulateurs (a) *Gerontological Test Suit (GERT)*, (b) *the Aged Simulation Set LM-060*, (c) *Age Gain Now Empathy System (AGNES)*, (d) *Genworth R70i* et (e) *Sakamoto Model M176*

Les sens et la motricité permettant d'interagir avec l'environnement, comprendre ces modifications et leurs conséquences fonctionnelles chez les personnes âgées permettrait de les reproduire expérimentalement et avec précision par le biais des simulateurs de vieillissement chez des individus jeunes. Groza et al. (2017) distinguent alors quatre modules à intégrer aux simulateurs de vieillissement afin de rendre compte au mieux de l'ensemble des changements sensorimoteurs liés à l'âge : le module de tête (vue, ouïe et motricité du cou), du torse (mouvements de la colonne vertébrale), des bras (toucher, mouvements des articulations et motricité fine) et des jambes (marche et motricité globale). Il est cependant important de noter que certains déclins sensoriels, notamment gustatifs et olfactifs, sont difficilement simulables malgré le fait que ces sens soient affectés par le vieillissement. Les personnes âgées présentent souvent une hypogueusie, soit une diminution du nombre et de la sensibilité des papilles gustatives, et le seuil de détection des odeurs est augmenté avec l'avancée en âge (Mondon et al., 2014).

3.1.1. LA VUE : UN DES SENS LES PLUS TOUCHÉS PAR L'AVANCÉE EN ÂGE

L'œil subit des changements anatomiques réduisant la vision des individus vieillissants (voir Grossniklaus et al., 2013; Salvi, 2006 pour des revues de littérature des modifications anatomiques et fonctionnelles). Le cristallin perd de son élasticité, s'opacifie progressivement et jaunit – limitant sa transparence et sa déformabilité. La courbure comme la transparence de la cornée diminuent. La pupille est plus petite et réagit plus lentement, ayant pour conséquence une ouverture pupillaire moins importante dans l'obscurité. Ces modifications anatomiques induisent des altérations fonctionnelles. En effet, l'acuité visuelle est diminuée, tant pour la vision statique (perception d'objet immobile) que pour la vision dynamique (perception d'objet en mouvement). La perception des couleurs est modifiée – en commençant par les couleurs jaunes et bleues. Le champ visuel est rétréci, tout comme la sensibilité aux contrastes. L'adaptation entre lumière et obscurité est plus difficile et les personnes âgées peuvent alors être sensibles à la lumière éblouissante.

Quatre pathologies visuelles sont majoritairement décrites chez les personnes âgées. La plus fréquente et liée au processus de vieillissement normal, la presbytie, est caractérisée par une réduction de l'accommodation entre la vision de près et de loin, induisant une gêne dans la lecture ou la vision de près. La cataracte est également liée aux modifications du cristallin. Ce dernier s'opacifie, ne laissant plus la lumière atteindre la rétine, provoquant une vision floutée et une baisse de l'acuité visuelle. Ainsi, les personnes âgées touchées par la cataracte sont souvent sensibles à la lumière, ont des difficultés dans la perception de la profondeur ou encore des couleurs. La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), est une maladie touchant la macule, partie de la rétine permettant la vision centrale. Cette maladie, pouvant causer la cécité, est caractérisée par une déformation des lignes droites, une diminution de l'acuité visuelle, une tâche au centre de la vision et une diminution de la sensibilité aux contrastes. Enfin, le glaucome est une maladie neurodégénérative caractérisée par une pâleur croissante et une augmentation de la pression oculaire, qui va alors diminuer l'acuité visuelle et dégrader le nerf optique et les cellules nerveuses. Ces trois derniers troubles visuels sont considérés comme pathologiques, et n'apparaissent pas systématiquement au cours du vieillissement.

Les simulateurs de vieillissement ont alors inclus, pour la plupart, des lunettes reproduisant les modifications liées au vieillissement visuel normal : perception des couleurs modifiée, sensibilité à la lumière éblouissante et rétrécissement du champ visuel. Des accessoires peuvent être ajoutés à certains simulateurs, notamment le GERT, afin de rendre compte des différentes pathologies

visuelles, soit la DMLA, la cataracte ou encore le glaucome. D'autres simulateurs, dont le *Genworth R70i,* ont opté pour des systèmes de réalité augmentée permettant de moduler les différents effets du vieillissement sur la vision, traduisant bien l'hétérogénéité du processus de vieillissement. Peu d'études utilisant les simulateurs ont été réalisées afin d'illustrer et quantifier ces changements. Par exemple, Frison et al. (2018) ont réalisé des entretiens semi-directifs, dans le but de recueillir les attentes et les réflexions de participants jeunes (avec et sans simulateurs) et âgés, afin d'adapter les équipements des voitures aux personnes âgées. Cette étude qualitative rapporte des modifications visuelles importantes lors du port du simulateur illustrant le déclin visuel des adultes âgés. Une seconde étude qualitative et écologique met également en avant des modifications visuelles perturbant un ensemble de tâches à réaliser dans une grande surface (Lavallière et al., 2017).

3.1.2. DIMINUTION DE L'AUDITION : UN SENS IMPORTANT MAIS PEU ÉTUDIÉ

L'audition, particulièrement importante dans la communication avec l'autre, est également un sens impacté par le vieillissement. D'un point de vue anatomique, le conduit auditif s'atrophie et la membrane tympanique s'épaissit. L'oreille interne est également modifiée : l'altération la plus courante étant une diminution du nombre de cellules ciliées associée à une diminution des fibres nerveuses auditives (Chisolm et al., 2003). Ces changements sont à l'origine de la presbyacousie, caractérisée par une perte de l'audition et particulièrement des fréquences les plus aiguës, entraînant des difficultés dans la compréhension de la parole dans des environnements bruyants, mais aussi à situer un bruit dans l'espace (Bouccara et al., 2005). Suivre une conversation de plus de trois ou quatre personnes devient difficile. La presbyacousie peut s'accompagner d'acouphènes, bruits parasites (pouvant être des pulsations ou des bourdonnements) sans lien avec l'environnement. Ces effets liés au processus normal du vieillissement peuvent alors s'ajouter à d'autres troubles auditifs acquis (par ex. traumatisme, otite). La presbyacousie est la cause la plus fréquente de surdité chez les personnes âgées, mais serait également une cause importante d'isolement social.

Un grand nombre des simulateurs de vieillissement utilise des écouteurs ou casque anti-bruit limitant l'entrée du son dans le conduit auditif, et donc la perception des sons. Ici aussi, des accessoires supplémentaires peuvent s'ajouter afin de reproduire plus précisément les déclins auditifs liés à l'avancée en âge, notamment un simulateur d'acouphènes pour le simulateur GERT. Le casque auditif utilisé dans le dispositif *Genworth R70i* permet, par ailleurs, de simuler une presbyacousie et peut être couplé à des acouphènes plus ou moins intenses. L'avantage de

la modulation possible sur ce dernier simulateur est qu'il permet de diminuer, tout comme dans le vieillissement, les fréquences les plus aiguës en ajoutant des acouphènes contrairement à un casque auditif classique qui limite seulement l'entrée de sons de manière plus générale. Malgré l'importance de ce sens dans la communication, aucune étude, à notre connaissance, ne s'est focalisée sur les performances auditives de personnes jeunes avec un simulateur de vieillissement.

3.1.3. LE TOUCHER, PLUTÔT CONSERVÉ

Le toucher, impliquant le fait de sentir la forme, la vibration ou encore la pression, est un sens assez bien conservé avec le vieillissement, bien que des changements soient observés (voir Wickremaratchi, 2006 pour une revue de littérature). Le nombre de récepteurs diminue, ce qui va alors augmenter le seuil de perception, les sensations devant être plus intenses afin d'être perçues (par ex. Kenshalo, 1986). Les habiletés somesthésiques complexes, notamment la sensibilité épicritique (capacité à distinguer deux sensations tactiles comme distinctes), diminue avec l'âge. En effet, de récentes études soulignent que les capacités de discrimination de texture sont réduites chez les personnes âgées, chez qui des modifications cutanées sont également observées (par ex. humidité et élasticité de la peau ; Skedung et al., 2018). De plus, les vibrations seraient plus absorbées par la peau chez les personnes âgées que chez les personnes plus jeunes, induisant une excitation des récepteurs sensoriels moins importante (Verrillo, 1980). Ces modifications tactiles vont alors avoir des conséquences dans les gestes fins quotidiens, impliquant les mains ou les doigts, comme l'écriture, puisque le toucher permet d'identifier et manipuler les objets. Les simulateurs de vieillissement vont alors reproduire ces diminutions par l'utilisation de gants ou des protections pour les doigts. Ce sens étant moins affecté par le vieillissement, les équipements des différents simulateurs, comme les études les évaluant, ne sont que peu développés.

3.1.4. LA MOTRICITÉ FINE ET GLOBALE, CAPACITÉS LES PLUS ÉTUDIÉES DES SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT

Au niveau moteur, les modifications histologiques et anatomiques survenant avec l'avancée en âge peuvent perturber les capacités motrices. Le nombre et la taille des fibres musculaires, comme la masse osseuse, diminuent. Cela induit une réduction de la masse musculaire au profit de la masse grasse, appelée sarcopénie, ainsi qu'une diminution de la résistance mécanique de l'os. Les modifications du cartilage (par ex. amincissement), liées à une modification dans les compositions biochimiques, induisent une fragilité de ce tissu. Ainsi, les personnes âgées peuvent être sujettes à de l'arthrite ou une rigidité articulaire, une diminution de la masse

musculaire, une exécution des mouvements plus lente et une diminution de la coordination et de la souplesse (voir Seidler et al., 2010). Toutes ces modifications, retrouvées au cours du vieillissement normal, entraînent alors un risque de chute et de fracture plus important. Il est toutefois important de préciser que ces modifications sont modulées par de nombreux facteurs environnementaux, tels que la pratique d'activité physique.

Ces modifications vont alors perturber la motricité globale des personnes vieillissantes. La marche est l'exemple le plus flagrant de ces changements moteurs globaux (VanSwearingen & Studenski, 2014). En effet, les muscles doivent se raccourcir et les articulations être mobiles afin de permettre une marche harmonieuse. La sarcopénie et les articulations plus figées peuvent complexifier le lever de jambe ainsi que la flexion ou l'extension de la cheville. Ainsi, les personnes âgées peuvent avoir une marche plus lente, à petits pas. L'équilibre est également modifié, les individus âgés pouvant avoir des difficultés à tenir les pieds joints ou en appui unipodal. Enfin, au niveau de la stature globale, le bassin se rétroverse, et par correction, les personnes âgées ont donc tendance à courber le dos. Ainsi, la marche peut devenir coûteuse en ressources cognitives puisque moins automatique (par ex. Godde & Voelcker-Rehage, 2017; Hausdorff et al., 2005). Enfin, la motricité fine, telle que la préhension, est moins rapide et moins précise.

Pour reproduire ces changements moteurs, on retrouve dans un grand nombre de simulateurs des exosquelettes limitant les mouvements corporels globaux notamment ceux de la colonne vertébrale, mais aussi de façon plus précise en ciblant les articulations (genoux, coudes, épaules) ainsi que des poids simulant la perte musculaire et l'augmentation de la masse grasse. Des accessoires complémentaires peuvent également s'ajouter aux dispositifs comme des colliers cervicaux pour limiter les mouvements du cou, des surchaussures pour modifier la démarche ou encore des simulateurs de tremblement des mains pour les mouvements fins.

Les équipements limitant la motricité étant nombreux dans les différents modèles de simulateur, une grande partie des études utilisant ces simulateurs se sont focalisées sur les aspects moteurs. Ainsi, elles ont tenté d'attester des modifications motrices induites par ces simulateurs, en comparant les résultats avec ceux d'individus jeunes contrôles, d'individus âgés ou encore avec des normes existantes chez les individus âgés. Par exemple, Gaggioli et al. (2018) ont comparé, sur deux tâches de motricité fine sur téléphone, un groupe de personnes âgées, un groupe d'individus jeunes sans simulateur et trois groupes d'individus jeunes avec simulateur pour créer des perturbations (1) visuelles, par l'utilisation de lunettes spécifiques, (2) motrices, touchant le haut du corps par un collier cervical, des coudières, des poids au niveau des poignets, un gilet de

poids et des gants pour les mains, ou (3) visuomotrices combinant l'ensemble de ces équipements. Pour ces deux tâches, les meilleures performances sont obtenues par les individus jeunes contrôles, sans simulateur. Chez les individus jeunes portant le simulateur, les perturbations visuomotrices combinées sont plus délétères pour les performances qu'une perturbation motrice ou visuelle seule et permettraient la meilleure approximation des performances des personnes âgées, bien que les âgés aient les moins bonnes performances. Dans une autre étude, des individus jeunes ont réalisé quatre tâches motrices plus globales (équilibre postural, amplitude de mouvements des épaules et du cou, souplesse du bas du dos et des ischio-jambiers, démarche) avec et sans simulateur de vieillissement (Lavallière et al., 2017). Les résultats mettent en évidence un déficit des performances physiques lié au port du simulateur dans chacune des tâches motrices proposées.

Malgré l'importance de la marche et les effets du vieillissement normal sur cette dernière, une seule étude a analysé les différents paramètres qui la caractérisent : vitesse de marche (cm/s), longueur et largeur des pas (cm), et temps d'appui des pas (s) (Lauenroth et al., 2017). Les résultats montrent alors des performances équivalentes entre individus jeunes portant le simulateur et individus âgés sur les paramètres de vitesse de marche et de longueur des pas. Les auteurs de cette étude estiment alors, par comparaison avec des personnes âgées, que le port du simulateur augmenterait de 20 à 25 ans l'âge réel des individus jeunes. Ces observations sont confirmées par d'autres études, notamment celle de Vieweg et Schaefer (2020), ajoutant que les participants jeunes (environ 22 ans) ont perdu entre 12 et 26% de leurs capacités motrices globales et entre 20 et 30% de leur motricité fine en portant le simulateur. Un des points intéressants de cette dernière étude est la comparaison des performances motrices avec des normes motrices établies chez des personnes âgées : les performances de motricité globale se rapprochent de celle des individus de 60 ans tandis que celles de motricité fine des individus de 80 ans et plus. Ainsi, la diminution des performances motrices observée lors du port du simulateur dépendrait des habiletés motrices mesurées mais permettrait toutefois d'avoir une expérience générale du vieillissement physique. Enfin, bien que certains facteurs génétiques ou encore physiologiques ne puissent pas être pris en considération avec les simulateurs, ceux-ci reflèteraient le processus de vieillissement et ses différences interindividuelles physiques (par ex. niveau d'activité physique, habitudes alimentaires de l'individu jeune).

3.2. SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT ET COGNITION INCARNÉE ET SITUÉE

3.2.1. LA COGNITION INCARNÉE ET SITUÉE : UN LIEN ENTRE SENSORIMOTRICITÉ ET MÉMOIRE

La plupart des travaux portant sur la cognition se réfèrent à une approche cognitiviste dans laquelle la cognition correspond à une suite d'opérations sur des symboles abstraits et amodaux, c'est-à-dire sans lien avec la sensorimotricité et l'environnement qui a permis ces opérations. Depuis quelques décennies, la littérature se référant à une approche incarnée et située est grandissante. Cette approche envisage la cognition comme étant ancrée dans le corps par les éléments sensorimoteurs (aspect incarné dans le corps) et liée à la situation environnementale qui a permis ces expériences sensorimotrices (aspect situé dans l'environnement) (Barsalou, 2008).

Un des éléments clés dans cette approche est la simulation sensorimotrice, processus impliqué dans l'ensemble des traitements cognitifs impliquant une connaissance (par ex. les connaissances conceptuelles, la cognition sociale ou encore la mémoire, Dijkstra & Post, 2015; Mille et al., 2021; Rey et al., 2017; Versace et al., 2018). Ainsi, la perception d'un stimulus déclencherait de manière automatique une simulation mentale de l'interaction avec ce stimulus – comprenant alors des éléments sensoriels, moteurs et émotionnels vécus au cours des expériences passées et dépendant des compétences de la personne (Barsalou, 2008; Körner et al., 2015). Cette simulation sensorimotrice se rapproche donc de l'interaction que l'on pourrait avoir réellement avec le stimulus, et ce, jusqu'à activer des régions cérébrales similaires (par ex. Mollo et al., 2016). Par exemple, concernant les aspects moteurs, la simulation correspondrait à une activation du système moteur consécutif à la perception d'un stimulus. Cette activation du système moteur jouerait un rôle dans des processus cognitifs variés, comme la compréhension des actions d'autrui, des stimuli linguistiques liés à l'action (par ex. lecture de verbes d'action, Boulenger et al., 2006) ou encore l'identification d'objets manipulables (par ex. identification d'outils, Martin et al., 1996). Plus précisément, pour la mémoire, récupérer une trace mnésique implique une réactivation des états sensorimoteurs et émotionnels présents et encodés lors de l'expérience vécue (Xue, 2018), réactivation facilitée si les éléments sont représentés lors de la récupération.

Ces propos sont attestés par de nombreuses études en imagerie cérébrale, mettant en évidence une activation des aires sensorimotrices lors de traitements cognitifs de concepts liés à ces aires sensorimotrices et en l'absence de stimulations directes (par ex. Buccino et al., 2005; Hauk et al., 2004; Martin et al., 1995; Mollo et al., 2016; Pulvermüller et al., 2005; Simmons et al., 2005;

Willems et al., 2011). Hormis les études en imagerie cérébrale, les études comportementales concernant le lien sensorimotricité et cognition se multiplient, utilisant des protocoles expérimentaux de plus en plus originaux, bien que toutes ne retrouvent pas ce lien (par ex. Bidet-Ildei et al., 2017; Canits et al., 2018; Cortese et al., 2019; Díez-Álamo et al., 2019; Vallet et al., 2010; van Dam et al., 2010; Villatte et al., 2022; Yu & Wang, 2017; Zeelenberg et al., 2020 ; pour une revue de littérature, voir Dutriaux & Gyselinck, 2016a).

En considérant que la cognition prend racine dans les sens et la motricité, il paraît cohérent de supposer qu'une modification sensorimotrice conduirait à une modification cognitive. Certaines études ont utilisé le paradigme d'immobilisation, dans lequel une partie du corps (avant-bras et main dominante) est immobilisée pendant un certain temps, afin d'observer les effets de cette immobilisation sur la cognition (par ex. Bidet-Ildei et al., 2017). Les participants devaient catégoriser des verbes d'actions en indiquant si le verbe présenté impliquait les mains (par ex. écrire) ou les pieds (par ex. courir). Les participants immobilisés traitaient aussi rapidement les verbes d'action concernant la main et ceux concernant les pieds alors qu'une différence de temps de réponse est retrouvée chez les participants non immobilisés, dans le sens où ils catégorisaient plus rapidement les verbes d'action manuelle. En d'autres termes, le gain temporel pour les verbes d'action manuelle observé dans le groupe contrôle comparativement aux verbes d'action podale n'est plus présent lorsque le bras est immobilisé. Par le ralentissement du traitement sensorimoteur qu'elle induit, l'immobilisation ralentirait en retour la récupération de la trace mnésique concernant les verbes d'action manuelle.

De plus en plus d'études mettent en évidence qu'une modification motrice modifie les capacités mnésiques d'individus jeunes (par ex. Bidet-Ildei et al., 2017; de Vega et al., 2021; Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Villatte et al., 2021). Par exemple, la mémorisation d'objets serait affectée par une posture interférente, uniquement pour des objets considérés comme manipulables (Dutriaux & Gyselinck, 2016b). Dans leur étude, les auteurs ont présenté des mots ou des images d'objets manipulables et non manipulables à des individus jeunes dans deux situations : une posture contrôle où les mains étaient positionnées devant le participant et donc disponibles ; et une posture interférente dans laquelle les mains étaient croisées dans le dos du participant et donc non disponibles. Dans cette deuxième situation, les mots représentant des objets manipulables sont moins bien rappelés, ce qui n'est pas le cas des objets non manipulables. D'autres études, utilisant également le paradigme de posture interférente, ont mis en évidence une perturbation des traitements cognitifs des concepts d'action lorsque les mains ne sont pas disponibles, allant jusqu'à modifier les processus cérébraux (de Vega et al., 2021).

Enfin, en utilisant le paradigme d'immobilisation d'un membre, décrit précédemment, Villatte et al. (2021) ont mis en évidence, chez un groupe contrôle (non immobilisé, membres supérieurs disponibles), un temps de réponse plus long pour le rappel d'objets manipulables par rapport au rappel d'objets non manipulables. Cette différence n'est pas retrouvée pour le groupe ayant été immobilisé du bras droit. Ces résultats, bien que surprenants, sont expliqués par les auteurs par un temps supplémentaire nécessaire à l'activation des éléments moteurs associés à l'objet manipulable lors de la récupération de ce dernier, activation supprimée dans le groupe immobilisé par la mise à mal du système sensorimoteur. Cette étude confirme une modification du fonctionnement mnésique, ici mesurée par un temps de réponse lors d'une tâche de reconnaissance, avec immobilisation d'un membre. Dans cette dernière étude, et contrairement aux résultats de Dutriaux et Gyselinck (2016b), la précision des réponses ne variait pas avec l'immobilisation.

3.2.2. LE VIEILLISSEMENT : UN LIEN ENTRE SENSORIMOTRICITÉ ET MÉMOIRE ATTÉNUÉ ?

Les liens entre cognition et sensorimotricité au cours du vieillissement normal sont étudiés depuis quelques années déjà (par ex. Vallet et al., 2011; Vallet et al., 2013 ; voir Roberts & Allen, 2016 pour une revue de littérature). De nombreuses études avaient d'ores et déjà souligné un lien entre différentes modalités sensorielles et mesures cognitives, sans pour autant se placer explicitement dans un contexte incarné de la cognition. Par exemple, les capacités visuelles et auditives (Baltes & Lindenberger, 1997) ou tactiles (Li et al., 1998) des individus âgés (516 adultes âgés de 70 à 103 ans, sans atteinte neurologique) prédiraient leurs performances aux tests d'intelligence, mesurées par une batterie de tests comprenant du raisonnement, de la mémoire, des fluences, de la vitesse de traitement et des connaissances générales. Les capacités visuelles seraient également associées aux altérations mnésiques et exécutives (Valentijn et al., 2005), toujours chez des personnes vieillissantes (n = 418), âgées entre 55 et 83 ans, sans atteinte neurologique. Humes et al. (2013) ont par ailleurs mis en évidence que l'efficience cognitive (mesurée par la *Wechsler Adult Intelligence Scale*, Wechsler, 1997) était médiée par les capacités sensorielles (vision, audition et toucher) auprès d'une population allant de 18 à 87 ans. Ces résultats sont retrouvés dans de nombreuses études basées pour la plupart sur les modalités visuelles ou auditives au cours du vieillissement normal (Baltes & Lindenberger, 1997; Lin, 2011; Lin et al., 2013; Lindenberger & Baltes, 1994; Moore et al., 2014 mais voir Anstey et al., 2001; Gussekloo et al., 2005; Hofer et al., 2003).

Si les effets du vieillissement sur les capacités auditives et visuelles normales sont les plus étudiés, ce sont également ceux qui sont les plus mis en lien avec le déclin cognitif dans la littérature actuelle. Comme décrit précédemment, l'ensemble des sens et la motricité peuvent être touchés par l'avancée en âge. Malgré cela, peu d'études se focalisent, par exemple, sur le lien entre cognition et motricité au cours du vieillissement normal. De nombreux effets, étudiés hors de ce contexte incarné, peuvent nous laisser entrevoir l'existence de ce lien. D'une part, l'activité physique régulière (par ex. entraînements musculaires) permet d'améliorer la force, la coordination, la posture et de prévenir les chutes (par ex. Barry & Carson, 2004). Plus précisément, la pratique d'une activité physique permet de développer les capacités et les compétences motrices grâce à l'entraînement. En particulier, au cours du vieillissement, cette pratique induit une augmentation de la masse musculaire et des performances du muscle en permettant une meilleure efficacité gestuelle, un maintien des habiletés motrices comme de force, une augmentation de l'amplitude et de la flexibilité des mouvements. L'activité physique module donc les effets délétères du vieillissement sur les aspects anatomiques et fonctionnels de la motricité.

D'autre part, les effets bénéfiques de l'activité physique sur la cognition au cours du vieillissement normal sont largement confirmés dans la littérature (par ex. Angevaren et al., 2008; Audiffren et al., 2011; Barha et al., 2017; Bherer & Pothier, 2021; Colcombe et al., 2003; Kelly et al., 2014; Quigley et al., 2020). Les liens entre activités physiques et cognition pourraient être approfondis à la lumière des approches incarnées et situées de la cognition. En effet, les bénéfices de l'activité physique sur la cognition pourraient être vus comme permettant une meilleure « incarnation » des éléments sensorimoteurs (c'est-à-dire, qui permettrait de se baser davantage sur les facteurs corporels). Ces bénéfices seraient plus importants chez les personnes âgées, ayant une moindre « incarnation » puisqu'elles utiliseraient davantage les traitements visuels que ceux liés au corps, tels que les facteurs tactiles ou proprioceptifs (Costello & Bloesch, 2017). En d'autres termes, le lien entre action et cognition pourrait être favorisé par la pratique d'activité physique. Enfin, la vitesse de marche prédirait le déclin cognitif chez les personnes âgées (par ex. Atkinson et al., 2007), laissant entrevoir ici aussi l'idée d'un lien entre motricité et cognition.

La mémoire est l'une des fonctions cognitives les plus touchées par l'avancée en âge. Cela est attesté de manière objective par de nombreuses études montrant un déficit de la mémoire lié à l'âge (par ex. Danckert & Craik, 2013) et par la fréquence importante des plaintes mnésiques rapportée par les personnes âgées elles-mêmes (Tannenbaum, 2005). Si d'un point de vue incarné

les traces mnésiques sont liées aux éléments sensorimoteurs, alors ces déclins mnésiques pourraient en partie s'expliquer par les altérations sensorielles et motrices subies par les personnes vieillissantes. Les traces mnésiques encodées seraient alors appauvries en éléments sensorimoteurs et moins spécifiques, leur distinctivité moins importante, ce qui augmenterait le nombre d'erreurs commises.

Dans ce contexte, Vallet et al. (2017) ont demandé à des personnes jeunes et âgées de réaliser une tâche sémantique dans laquelle les participants devaient établir un lien entre une image « modèle » (par ex. une pyramide) et une image parmi deux images proposées, comprenant une cible (par ex. un palmier) et un distracteur (par ex. un pin), avec comme objectif de mémoriser l'image cible. Suite à cela, l'ensemble des participants réalisait une tâche de rappel libre et une tâche de reconnaissance dans laquelle deux types d'items étaient présentés : des items cibles qui étaient à retenir et des distracteurs, ces derniers pouvant être des items distracteurs vus lors de la tâche sémantique (par ex. un pin) ou de nouveaux items (par ex. un bateau). Les personnes âgées rappellent effectivement moins d'items que les individus plus jeunes mais surtout, les individus âgés font plus d'erreurs de confusion ou de fausses alarmes, correspondant au rappel ou à la reconnaissance de distracteurs vus lors de la tâche sémantique. Aucune différence n'a été notée concernant les erreurs d'intrusion, donc le rappel ou la reconnaissance d'items totalement nouveaux. Cette étude souligne bien le fait que les erreurs les plus souvent commises dans le cadre du vieillissement normal sont des erreurs nécessitant de distinguer plus finement les items pour rejeter le distracteur, alors proches d'un point de vue perceptif. Ainsi, on pourrait parler de traces mnésiques de moins bonne qualité avec l'avancée en âge, expliquant le déclin mnésique associé au vieillissement (Vallet, 2015).

Quelques études ont effectivement cherché à voir si les modifications sensorimotrices et le déclin de la mémoire des concepts liés aux sens ou à la motricité au cours du vieillissement étaient liés, en se plaçant dans une vision incarnée de la cognition. En d'autres termes, les effets du vieillissement sur la cognition pourraient s'expliquer, en partie, par des modifications de l'incarnation sensorimotrice des personnes âgées. Par exemple, Dijkstra et al. (2007) ont mis en évidence une facilitation du rappel de souvenirs autobiographiques lorsque la position adoptée était congruente avec le souvenir. Cet effet était moins important chez les adultes âgés que chez les plus jeunes, ce qui suggère que ce lien motricité-mémoire est diminué dans le vieillissement. Ces résultats vont dans le sens d'une « incarnation » des représentations moins importante chez les personnes âgées (Costello & Bloesch, 2017). Avec l'avancée en âge et en fonction des éléments sensorimoteurs nécessaires à la tâche, les personnes âgées se baseraient plus sur la

modalité visuelle que sur les modalités impliquant le corps (i.e., toucher, proprioception), comparativement à des adultes jeunes (Costello & Bloesch, 2017). En effet, afin de compenser les déclins moteurs liés au vieillissement, une dominance des aspects visuels se met en place conduisant en des informations corporelles moins importantes lors des traitements cognitifs. En d'autres termes, la diminution du lien motricité-mémoire au cours du vieillissement observée par Dijkstra et al. (2007) pourrait s'expliquer par une moindre importance des modalités sensorielles impliquant le corps (i.e., toucher, proprioception) lors de la récupération des informations, malgré la posture congruente. La mémoire serait donc, dans cette étude, affectée par une moins bonne « incarnation » sensorimotrice.

Cependant, récemment, Dutriaux et al. (2021) ont répliqué une étude réalisée auprès de personnes jeunes (Dutriaux & Gyselinck, 2016b) chez des personnes âgées afin d'étudier l'impact de la dégradation motrice liée au vieillissement normal sur la mémoire d'objets manipulables en fonction de la posture (mains devant soi, disponibles vs. mains derrière le dos, non disponibles). En continuité avec les travaux de Dijkstra et al. (2007), les auteurs s'attendaient à n'observer aucun effet lié à la posture interférente chez les personnes âgées, contrairement aux personnes jeunes. En effet, Dutriaux et Gyselinck (2016b) ont mis en évidence que la posture interférente perturbe la simulation motrice des objets manipulables chez des personnes jeunes. Cependant, les personnes âgées ayant déjà une simulation motrice perturbée, liée aux modifications sensorimotrices, la posture ne devrait pas interférer avec cette simulation. Les scores de rappel des personnes âgées, dans cette étude, ont été tout autant perturbés par la posture interférente que celui des individus plus jeunes, et uniquement sur les objets manipulables. Ces résultats indiquent cette fois-ci que le lien motricité-mémoire n'est pas touché par le déclin moteur. Les auteurs expliquent alors ces résultats par : (1) une hypothèse alternative, les personnes âgées s'appuieraient davantage sur des informations sensorimotrices que les plus jeunes ou (2) un biais méthodologique, lié au choix des objets présentés, qui n'impliqueraient pas assez de mouvements fins et limités lors de l'avancée en âge.

En résumé, les données de la littérature semblent à l'heure actuelle contradictoires et mériteraient plus d'investigations afin de mieux appréhender les liens entre sensorimotricité et mémoire au cours du vieillissement normal.

3.2.3. SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT ET COGNITION INCARNÉE : DE NOUVELLES ÉTUDES À MENER

3.2.3.1. UTILISER LES SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT POUR ÉTUDIER LE VIEILLISSEMENT SENSORI-MOTEUR ET COGNITIF

Comme décrit dans le point 1, les simulateurs de vieillissement permettent, en effet, de reproduire certaines modifications sensorimotrices observées au cours du vieillissement chez des personnes plus jeunes. Si, comme le postulent les théories de la cognition incarnée, la cognition est effectivement d'origine sensorimotrice, nous pouvons nous demander si reproduire le vieillissement sensorimoteur chez des individus jeunes induirait des perturbations cognitives, et plus spécifiquement mnésiques, se rapprochant des perturbations observées chez les personnes âgées. Dans un premier temps, il serait intéressant de valider l'utilisation de ce simulateur d'un point de vue physique et sensoriel. En effet, bien que quelques études aient déjà évalué la diminution sensorimotrice (par ex. Lauenroth et al., 2017; Lavallière et al., 2017), certaines compétences restent peu étudiées malgré leur importance (par ex. vision, audition, toucher).

Deux études qualitatives (Frison et al., 2018; Lavallière et al., 2017) soulignent des modifications visuelles liées au port du simulateur chez des personnes jeunes perturbant les activités quotidiennes. Il serait alors pertinent de compléter ces données en quantifiant les changements à partir de tâches visuelles spécifiques (par ex. examen du champ visuel et de la perception des couleurs) et de comparer les performances de ces personnes jeunes portant un simulateur à celles de personnes plus âgées. En effet, ce dernier point permettrait de s'assurer que les performances obtenues suite au port du simulateur sont équivalentes à celles de personnes vieillissantes - subissant ces modifications visuelles de façon réelle. Ensuite, il serait pertinent de réaliser différentes études sur les accessoires simulant la perte auditive des simulateurs de vieillissement afin de s'assurer que les déficits consécutifs au port du simulateur sont également comparables à ceux observés classiquement dans le vieillissement. En effet, aucune étude ne s'est intéressée à ces déficits auditifs malgré l'importance qu'ils peuvent avoir au quotidien.

Deuxièmement, au niveau moteur, et plus particulièrement en ce qui concerne la vitesse de marche, l'étude réalisée par Lauenroth et al. (2017) mentionne une estimation de 20 à 25 ans supplémentaire à l'âge réel lors du port du simulateur de vieillissement par les adultes jeunes. Cependant, il serait pertinent de réaliser d'autres études sur les effets des simulateurs de vieillissement sur la marche afin de s'assurer de la validité de cet élément. Pour l'ensemble de ces points manquants, il serait également judicieux d'utiliser des tâches classiquement utilisées chez les personnes âgées (par ex. *Short Physical Performance Battery*, Guralnik et al., 1994 pour

les évaluations motrices) afin d'évaluer les effets des simulateurs de la façon la plus proche et la plus comparable à ce qui est habituellement réalisé chez les personnes âgées.

Enfin, la proprioception, aussi appelée « sixième sens », fait référence à l'ensemble des messages nerveux issus des mécanorécepteurs (provenant des muscles, des tendons, des ligaments ou encore de la peau) permettant la perception et la régulation des mouvements du corps, des articulations ou encore l'évaluation de la posture. Les différentes parties du corps sont représentées dans le cortex sensoriel, ce qui permet d'avoir des informations sur leur emplacement et leur mouvement. Ces informations rendent la proprioception importante pour la réalisation de mouvements fluides, l'équilibre mais aussi la posture. De nombreuses études rapportent, par ailleurs, des modifications proprioceptives chez les personnes âgées (appelées presbyproprie, Boisgontier et al., 2012), que ce soit pour les membres inférieurs ou les membres supérieurs (par ex. Ferrell et al., 1992; Hurley et al., 1998; Kaplan et al.,1985; Pai et al., 1997; Verschueren et al., 2002).

Malgré l'importance de ce sens au quotidien, aucune étude ne s'est intéressée aux effets des simulateurs de vieillissement sur la proprioception de personnes jeunes. Cependant, d'autres études ont montré chez de jeunes adultes sains qu'une courte période de privation forcée d'exercice (via un protocole d'immobilisation d'un membre allant de 10 heures à 24 heures selon les études) présentait des conséquences néfastes sur le fonctionnement des systèmes proprioceptif (Bassolino et al., 2012; Moisello et al., 2008), sensorimoteur (Meugnot et al., 2014; Toussaint & Meugnot, 2013) et cognitif (Bidet-Ildei et al., 2017; Villatte et al., 2021). Les auteurs suggèrent alors que la quantité de signaux concernant les mouvements est largement réduite lors de l'immobilisation du bras, ce qui, par conséquence, affecterait l'intégration des informations en provenance et en direction du système sensorimoteur et des processus cognitifs dont le fonctionnement dépendrait en partie de l'intégrité du système sensorimoteur.

Ainsi, au-delà des changements moteurs de force ou de précision décrits précédemment et mis en évidence dans les études utilisant les simulateurs de vieillissement, le ressenti des limitations musculaires comme articulaires liées aux exosquelettes pourrait alors induire des modifications proprioceptives chez les individus jeunes portant le simulateur de vieillissement, et même constituer un élément central des effets des simulateurs de vieillissement. En effet, les changements ressentis lors du port d'un simulateur concernent, en grande partie, des mouvements moins importants, moins amples (et donc une perception des mouvements volontaires du corps modifiée), des difficultés d'équilibre et de posture ; trois éléments centraux dans la proprioception et qui déclinent avec l'âge (par ex. Gong et al., 2019; Woodhull-McNeal,

1992). De plus, certains auteurs suggèrent un lien entre proprioception et cognition (Roll, 2003) mais aucune étude, à notre connaissance, n'a étudié le lien entre cognition et proprioception – point à développer dans la littérature selon nous.

Les simulateurs pourraient également permettre d'étudier plus profondément les aspects cognitifs du vieillissement mais également d'étayer les théories incarnées et situées de la cognition. De rares études ont d'ores et déjà utilisé les simulateurs de vieillissement pour évaluer les conséquences sur les performances cognitives. L'étude de Vieweg et Schaefer (2020), ayant mis en évidence des changements sensorimoteurs sur différentes tâches, a tenté de mettre en évidence un effet du port du simulateur sur la vitesse de traitement (à l'aide du Digit Symbol Substitution Test, Wechsler, 1997). Les résultats montrent alors une différence significative entre les deux sessions réalisées par les participants : avec et sans simulateur. Cependant, la tâche cognitive implique directement le système moteur afin de répondre (tâche « papier/crayon ») et se réalise en un temps limité (90 secondes). Les modifications visuelles (lunettes occultantes) et motrices (poids) auraient pu, à elles seules, diminuer les performances cognitives. Les futurs protocoles expérimentaux, se plaçant dans une perspective incarnée, devraient alors utiliser des tâches limitant ou contrôlant l'implication du système moteur afin d'étudier les effets de la diminution motrice liée au simulateur sur la cognition, en limitant les biais.

Bien que notre compréhension des modifications sensorimotrices liées aux simulateurs de vieillissement soit encore imparfaite, nous pouvons faire l'hypothèse que cet outil permettrait d'étudier chez des adultes jeunes une grande partie des modifications cognitives associées à des modifications sensorimotrices apparaissant au cours du vieillissement. Par exemple, certains facteurs impliquant la motricité peuvent affecter la cognition, comme l'activité physique et la sédentarité. Ces deux éléments et leurs effets respectifs sur la cognition pourraient être étudiés chez des individus jeunes portant la combinaison vieillissante. En effet, nous pourrions prédire que les déficits moteurs (et, dans un contexte incarné, les déclins cognitifs) liés au simulateur de vieillissement chez une personne jeune pratiquant des activités physiques seront moins importants que chez une personne jeune ne pratiquant pas d'activités physiques – tout comme une personne âgée pratiquant des activités physiques subira des modifications physiques (et, cognitives) moins importantes. Ainsi, le port du simulateur nous permettrait d'étudier le lien entre la cognition et l'ensemble des fonctions sensorimotrices, de manière concomitante, donc plus proche du processus de vieillissement en comparaison à une simple immobilisation du bras.

De la même manière, des facteurs psychosociaux tels que les stéréotypes pourraient être étudiés. En effet, ces représentations sur le vieillissement, pour la plupart négatives et portées par

l'environnement, tendent à diminuer les performances cognitives des personnes âgées (par ex. Bouazzaoui et al., 2016). Les théories de la cognition incarnée et située accordent une place importante à l'environnement dans lequel se développent les processus cognitifs. Ainsi, les modifications cognitives observées suite au port du simulateur de vieillissement pourraient être modulées par ces représentations, tout comme ce qui est observé chez les personnes plus âgées. En effet, certaines études montrent qu'il n'est pas nécessaire d'appartenir au groupe social pour ressentir et activer ces stéréotypes. Par exemple, les réponses motrices (par ex. temps de marche ou de réponse) de personnes jeunes chez qui les stéréotypes concernant les personnes âgées ont été activés sont plus longues, suite à cette activation, comparativement à d'autres personnes jeunes chez qui les stéréotypes n'ont pas été activés (par ex. Dijksterhuis et al., 2001; Follenfant et al., 2005). De plus, des personnes jeunes mise en situation de vieillissement physique par le biais d'un avatar en réalité virtuelle ont besoin de plus de temps pour réaliser une tâche d'imagerie mentale, par rapport à une situation contrôle (i.e., avatar d'une personne jeune) (Beaudoin et al., 2020).

De la même façon qu'une personne jeune est affectée d'un point de vue cognitif (i.e., imagerie mentale) lorsqu'elle s'identifie à une personne âgée par le biais d'un avatar, nous pourrions supposer que s'identifier à une personne âgée en portant un simulateur de vieillissement pourrait également influencer les performances cognitives. Ainsi, en précisant aux participants que la combinaison simule le vieillissement et en activant les stéréotypes internalisés sur le vieillissement, nous pourrions faire l'hypothèse d'un déficit cognitif, notamment mnésique, dans la condition de port d'un simulateur. Les personnes jeunes portant le simulateur se conformeraient alors, inconsciemment, à ces stéréotypes.

3.2.3.2. DES LIMITES LIÉES À L'UTILISATION DES SIMULATEURS DE VIEILLISSEMENT À CONSIDÉRER

Bien que l'intérêt des simulateurs pour l'étude du vieillissement soit notable, il est important de souligner et de considérer certaines limites concernant les modifications sensorimotrices obtenues par les simulateurs de vieillesse en comparaison au processus réel de vieillissement. Dans un premier temps, la temporalité des effets entre une personne portant un simulateur et une personne vieillissante est différente et amène plusieurs questionnements. En effet, lors du port d'un simulateur de vieillissement, les changements sensorimoteurs sont soudains tandis que lors du processus de vieillissement, les changements sensorimoteurs sont progressifs et réguliers. Ainsi, les effets - ou l'absence d'effet - observés sur la cognition lors du port du simulateur pourraient s'expliquer par cette différence majeure. Il serait néanmoins possible de contrôler, au

moins en partie, cette limite dans une étude comparant les effets physiques et cognitifs observés lors de différents temps de port du simulateur. Ainsi, nous pourrions être capables d'évaluer le poids de cette limite.

Dans un second temps, le vieillissement est un processus hétérogène, impliquant de nombreuses variables, tant génétiques qu'environnementales. Ainsi, les effets de certaines de ces variables, notamment les variables environnementales, peuvent être pris en considération lors du port d'un simulateur de vieillesse : par exemple, les effets de l'âge (simulés par le port de la combinaison vieillissante) sur les tâches motrices (et peut-être cognitives) pourraient être réduits chez les participants pratiquant de l'activité physique. Cet élément, bien qu'évoqué dans certaines études sur les diminutions motrices liées au simulateur (par ex. Vieweg & Schaefer, 2020), n'est pas pris en compte dans les caractéristiques des individus jeunes portant le simulateur. Cependant toutes les variables intervenant dans le processus de vieillissement ne peuvent pas être étudiées par le simulateur de vieillissement (par ex. génétique), et l'aspect hétérogène du vieillissement pourrait donc être moins bien reflété qu'en réalité. En effet, les déclins sensorimoteurs comme cognitifs au cours du vieillissement dépendent de variables génétiques et environnementales. Il est alors difficile de simuler, à l'aide de ces combinaisons vieillissantes, les effets de l'âge liés aux facteurs génétiques. Ainsi, les simulateurs de vieillissement mimeraient une avancée en âge supposée, indépendante de ces facteurs génétiques.

Dans le même ordre d'idée, parmi les éléments constituant les simulateurs de vieillissement, nous retrouvons des poids ou des entraves dans le but de reproduire la sarcopénie (i.e., augmentation de la masse grasse et diminution de la masse musculaire) et limitant l'amplitude des mouvements. Cependant les poids, comme les entraves, sont similaires pour chaque personne jeune, aucune norme ne précisant le poids à ajouter (par ex. pourcentage de poids en fonction du poids de base). Le vieillissement étant hétérogène et dépendant de nombreuses variables, il est probable que les modifications apportées par les simulateurs soient trop importantes ou au contraire pas assez importantes (par ex. trop ou pas assez de poids supplémentaires). Ce point n'est, à notre connaissance, pas abordé dans les articles concernant les effets moteurs induits par le simulateur et mériterait une plus grande investigation.

Par ailleurs, les simulateurs ne permettent pas de simuler la totalité des modifications sensorimotrices observées au cours du vieillissement. Par exemple, pour la vision, les dispositifs utilisés dans un grand nombre des simulateurs – hors dispositifs complémentaires simulant les pathologies visuelles – mimeraient seulement une partie des modifications visuelles : modification de la perception des couleurs, sensibilité plus importante à la lumière éblouissante

et rétrécissement du champ visuel. D'autres difficultés visuelles liées au vieillissement, telle que la diminution de l'acuité, ne sont alors pas simulées. L'audition peut également être un exemple de limites dans la simulation des déclins sensoriels liés à l'âge. Comme précisé auparavant, une grande partie des simulateurs utilisent des casques auditifs classiques limitant l'entrée de son de manière générale et non spécifique aux sons aigus. Le processus de vieillissement induit une perte auditive commençant par les fréquences aigües, pouvant être accentuée en cas de troubles. Les simulateurs induisant, pour la plupart, une perte auditive non sélective, ce déclin pourrait être plus important avec le port du simulateur que lors du vieillissement normal.

Enfin, les interprétations des résultats de ces futures études devront être précautionneuses. Contrairement à une attelle (Villatte et al., 2021) ou une posture interférente (Dijkstra et al., 2007), ces simulateurs permettraient de reproduire plus précisément les déclins sensorimoteurs concomitants au cours du vieillissement décrit par Correia et al. (2016), et se rapprocheraient donc du processus réel de vieillissement. Ainsi, les conclusions des futures études pourront éclairer plus précisément notre connaissance du vieillissement, sans toutefois omettre l'impact éventuel de la modification motrice induite par le simulateur lors de l'interprétation de ces futurs résultats. Enfin, en dehors du simulateur de vieillissement, la compréhension des liens entre changements sensorimoteurs et cognitifs avec l'avancée en âge devrait également faire l'objet d'études longitudinales dans le but d'évaluer au mieux ces deux déclins conjointement.

Pour conclure, la compréhension des changements sensorimoteurs et cognitifs liés à l'avancée en âge étant un enjeu sociétal important, il est important de mieux appréhender les liens entre modifications sensorielles et cognitives. En effet, d'un point de vue théorique, une meilleure connaissance des liens entre processus sensoriels et/ou moteurs et cognition est indispensable à la caractérisation des déclins cognitifs au cours du vieillissement, et particulièrement des processus mnésiques relatifs aux plaintes des personnes âgées. En prenant ce point de vue incarné, nous pouvons étudier le vieillissement par le biais de nombreux outils, y compris les simulateurs de vieillissement encore peu utilisés dans la recherche sur le vieillissement cognitif. Enfin, s'il s'avère que des liens importants existent entre les altérations sensorimotrices et cognitives, leur mise en évidence serait une aide précieuse aux professionnels prenant en charge les personnes âgées, notamment les personnes âgées dépendantes. Les évaluations et aides proposées pourraient alors être adaptées afin de stimuler les difficultés de ces personnes âgées par différentes techniques, combinant sensorialité, motricité et cognition. Ainsi, ce nouveau point de vue permettrait à la fois de mieux comprendre le vieillissement cognitif et d'amener de nouveaux questionnements comme de nouvelles interventions auprès de personnes âgées.

Points importants – Chapitre 2

- **Mémoire : sensorimotricité et environnement**

Selon l'approche incarnée et située, les traces mnésiques dépendraient des expériences sensorimotrices ainsi que de l'interaction entre le corps et l'environnement (physique, social, culturel).

- **Les modifications motrices induisent des changements cognitifs**

Les études réalisées chez les adultes jeunes montrent qu'une perturbation motrice périphérique (par ex. posture interférente, immobilisation d'un bras) modifie les traitements cognitifs réalisés sur les concepts liés aux actions (i.e., objets manipulables, verbes d'action). Chez les adultes âgés, les résultats sont à l'heure actuelle controversés : certaines études indiquent que le lien mémoire-motricité est diminué avec l'âge tandis que d'autres indiquent que ce lien est préservé.

- **Importance de l'environnement dans les performances motrices et mnésiques**

Les stéréotypes internalisés, notamment les stéréotypes négatifs liés à l'âge, peuvent affecter les performances mnésiques comme motrices des adultes âgés (menace du stéréotype). Les adultes jeunes peuvent également être influencés par ces stéréotypes lorsqu'ils sont mis en situation de vieillissement fictif.

- **Le simulateur de vieillissement : un outil intéressant**

Des simulateurs de vieillissement, permettant de mimer un vieillissement physique chez des adultes jeunes, peuvent alors être utilisés pour étudier ce lien mémoire-motricité tout en incluant les facteurs environnementaux (i.e., stéréotypes).

Problématique générale

L'objectif général de ce travail de thèse était d'explorer l'implication du corps et de l'environnement dans le fonctionnement mnésique au cours du vieillissement. La littérature a fait émerger deux axes de recherches principaux : **l'activité physique**, un des facteurs protecteurs des effets de l'âge sur les processus mnésiques, et la **motricité**, un des éléments constitutifs des traces mnésiques elles-mêmes. La considération de ces deux axes permet de représenter au mieux le fonctionnement mnésique en lien avec l'interaction du corps avec son environnement. Pour permettre une compréhension plus globale des processus mnésiques en lien avec le corps et l'environnement, ces derniers ont été étudiés selon une approche cognitiviste et une approche incarnée et située de la cognition. En ce sens, nous n'avons pas souhaité opposer ces deux approches, mais plutôt les considérer comme permettant d'illustrer différents phénomènes répondant à une même question théorique. En effet, l'activité physique nous permet d'illustrer l'importance du corps sur les fonctions exécutives, permettant de soutenir le fonctionnement de la mémoire. La motricité nous permet, à l'aide des méthodologies et apports de l'approche incarnée et située, de montrer l'importance du corps dans la qualité de la trace mnésique. Le schéma présenté **Figure 6** résume les liens étudiés par les Études 1 et 2 (flèches en pointillés) et par les Études 3 et 4 (flèches pleines), dépendantes d'un ancrage théorique différent.

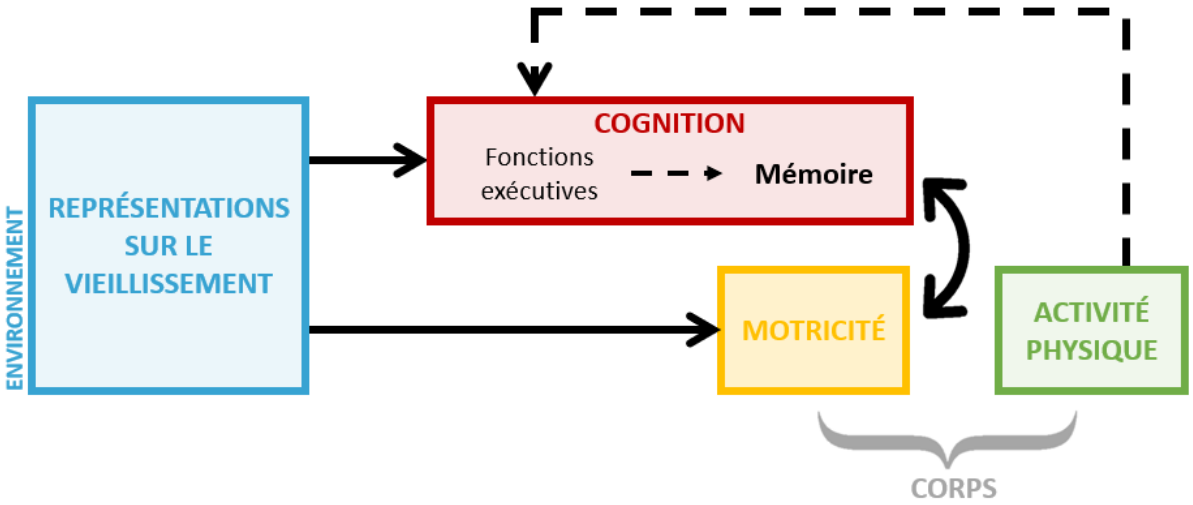


Figure 1. Liens étudiés dans les Études 1 et 2 (flèches en pointillés, approche cognitiviste) et les Études 3 et 4 (flèches pleines, approche incarnée et située)

Les effets de l'âge sur la mémoire épisodique seraient, en partie, liés à des difficultés dans les processus stratégiques auto-initiés permettant d'encoder ou de récupérer les informations en mémoire en l'absence de support environnemental ou d'indice. Ces difficultés dans la mise en

place des processus stratégiques auto-initiés sont expliquées par la diminution des capacités exécutives.

Néanmoins, les changements mnésiques observés chez les adultes âgés sont variables et peuvent dépendre des habitudes de vie de chacun. De nombreuses habitudes de vie, dont l'activité physique, sont considérées comme des facteurs de réserve puisqu'elles permettent de faire face aux effets délétères du vieillissement normal par des modifications au sein des mécanismes cérébraux et/ou des processus cognitifs. Les études indiquent que des bénéfices de l'activité physique sont observés sur les performances aux tâche exécutives d'une part et sur les performances mnésiques d'autre part. La littérature place donc l'activité physique comme un facteur particulièrement intéressant afin de démontrer l'implication du corps dans le fonctionnement mnésique au cours du vieillissement. Bien que les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire au cours du vieillissement aient été décrits à de nombreuses reprises dans la littérature, certaines études démontrent un effet bénéfique plus importants sur les tâches mnésiques les plus complexes, sans pour autant être mis en lien avec le coût exécutif de la tâche mnésique réalisée.

Dans le **premier axe de recherche** de ce travail de thèse, l'implication du corps sur les capacités mnésiques a été illustrée par l'activité physique. Cette dernière, par ses effets bénéfiques sur les fonctions exécutives, soutiendrait les étapes d'encodage et de récupération en mémoire. Ainsi, les études réalisées (Études 1 et 2) visaient à comprendre les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire au travers des fonctions exécutives. En d'autres termes, l'activité physique permettrait de maintenir le fonctionnement exécutif malgré les effets de l'âge, qui permettrait lui-même de préserver les performances mnésiques.

Dans la **première étude** (Moutoussamy et al., 2022), nous avons cherché à vérifier que les effets bénéfiques de l'activité physique différaient selon le coût exécutif de la tâche mnésique réalisée. Plus précisément, l'étude visait à mettre en évidence, chez les adultes âgés, un bénéfice de l'activité physique plus important sur une tâche de rappel libre que sur une tâche de rappel indicé, moins coûteuse en ressources exécutives. Dans la **deuxième étude** (Moutoussamy et al., en révision), nous avons cherché à confirmer l'implication des fonctions exécutives dans les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire chez les adultes âgés. Plus précisément, l'étude visait à expliquer les effets de l'âge sur la mémoire par les fonctions exécutives, elles-mêmes expliquées par la pratique d'activité physique.

En plus de l'activité physique, la motricité pourrait également être un facteur pertinent pour illustrer l'implication du corps dans le fonctionnement mnésique au cours du vieillissement puisque la motricité serait une composante des traces mnésiques. En effet, l'approche incarnée et située de la cognition suggère que les processus mnésiques dépendent de la sensorimotricité et du contexte environnemental dans lequel les traces mnésiques prennent naissance. À partir de ces affirmations, des études ont montré qu'une altération de la motricité d'adultes jeunes (immobilisation d'un membre ou une posture interférente) affecte la mémorisation de concepts d'action (i.e., objets manipulables, verbes d'action).

La question d'une diminution sensorimotrice affectant le fonctionnement mnésique peut être étendue aux effets du vieillissement sur la mémoire. En effet, les adultes âgés présentent des changements affectant à la fois les sphères sensorielle, motrice et mnésique. Dans une approche incarnée et située, ces changements concomitants seraient liés. Plus précisément, les traces mnésiques encodées seraient appauvries en éléments sensorimoteurs, donc moins spécifiques et moins distinctes les unes des autres. Néanmoins, à l'heure actuelle, les études s'intéressant aux modifications motrices et la mémoire des concepts d'action au cours du vieillissement ne permettent pas d'établir de conclusion quant aux changements du lien motricité-mémoire.

Par ailleurs, le contexte environnemental a une place particulièrement importante au sein de l'approche incarnée et située. De nombreuses études réalisées dans le domaine de la cognition sociale appuient l'importance de l'environnement dans les performances mnésiques comme motrices. L'activation des représentations négatives sur le vieillissement peuvent affecter les capacités mnésiques et motrices des adultes âgés. De manière générale, les effets des stéréotypes négatifs sur le vieillissement sont étudiés auprès d'adultes âgés puisque ces derniers sont visés par ces stéréotypes. Néanmoins, de plus en plus d'études examinent les effets d'un vieillissement fictif, par la réalité virtuelle, sur les capacités d'adultes jeunes. Ces études indiquent que les performances motrices et cognitives des adultes jeunes sont affectées lorsqu'ils sont placés en situation de vieillissement fictif. Aucune étude n'évalue les effets du vieillissement fictif en réalité virtuelle sur les performances mnésiques.

Le **deuxième axe de recherche** de ce travail de thèse (Études 3 et 4) visait à mettre en évidence, à l'aide de simulateurs de vieillissement, l'importance de la motricité au sein des traces mnésiques, en fonction du contexte environnemental. Ces outils ont été développés afin de placer des adultes jeunes dans un vieillissement fictif en induisant des difficultés motrices se rapprochant des difficultés des adultes âgés. Ce vieillissement fictif lié au simulateur pourrait, comme en réalité virtuelle, modifier les capacités cognitives. A l'heure actuelle, peu d'études se

sont intéressées aux modifications cognitives associées au simulateur de vieillissement, et aucune ne porte sur les modifications mnésiques que pourrait entraîner le port du simulateur de vieillissement. Par ailleurs, l'utilisation de simulateur de vieillissement présente un avantage considérable par rapport à la réalité virtuelle. Lorsqu'un individu utilise un avatar âgé, il identifie l'effet vieillissant suggéré par l'avatar. Lorsque le simulateur de vieillissement est utilisé, le caractère vieillissant peut ne pas être directement associé à la combinaison. Cela permet de modifier le contexte environnemental dans lequel est placé l'individu, en mentionnant ou non l'effet vieillissant de la combinaison.

La **troisième étude** a cherché à confirmer que le simulateur de vieillissement permettait bien de modifier les performances motrices, mais que ces modifications pouvaient dépendre du contexte environnemental. Ainsi, un premier lien entre motricité et environnement serait mis en évidence dans une situation de vieillissement fictif. Enfin, la **quatrième étude** avait pour objectif d'étendre les liens entre la motricité et le contexte environnemental aux processus mnésiques. Cette étude, à visée exploratoire, est la première à s'intéresser aux effets d'un vieillissement fictif sur les performances mnésiques d'adultes jeunes. Le protocole expérimental mis en place permettait de modifier à la fois les aspects incarnés et situés des processus mnésiques.

Travaux expérimentaux

Sommaire

ÉTUDE 1. Les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire au cours du vieillissement dépendent des ressources exécutives nécessaires à la tâche mnésique 65

ÉTUDE 2. L'effet protecteur de l'activité physique sur la mémoire épisodique au cours du vieillissement s'explique par les fonctions exécutives 87

Points importants – Études 1 & 2 105

ÉTUDE 3. Simulateur de vieillissement et performances motrices chez les jeunes adultes : les effets dépendent de la raison pour laquelle le simulateur est porté ! 106

ÉTUDE 4. Incarner une personne âgée physiquement peut-il modifier la mémoire d'adultes jeunes ? 125

Points importants – Études 3 & 4 155

Étude 1

LES BÉNÉFICES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LA MÉMOIRE AU COURS DU VIEILLISSEMENT DÉPENDENT DES RESSOURCES EXÉCUTIVES NÉCESSAIRES À LA TÂCHE MNÉSIQUE[9]

De nombreuses études rapportent des changements de performances mnésiques liés à l'avancée en âge (Balota et al., 2000). Ces changements seraient, par ailleurs, plus importants dans les tâches mnésiques ne fournissant que peu ou pas de support environnemental guidant l'encodage ou la récupération en mémoire (Angel et al., 2010; Taconnat et al., 2022). Ces changements mnésiques liés à l'âge peuvent, en partie, s'expliquer par les modifications de fonctionnement exécutif (West, 1996, 2000), impliqué dans les aspects stratégiques de la mémoire (Guerrero-Sastoque et al., 2019; Taconnat et al., 2007, 2009, 2022). Plus précisément, les effets de l'âge seraient plus marqués lors de tâches mnésiques nécessitant le plus de stratégies auto-initiées et donc de ressources exécutives (Frick et al., 2022; Froger et al., 2009; Rhodes et al., 2019). Néanmoins, il existe des variations inter-individuelles importantes sur les performances mnésiques des adultes âgés. Ces variations peuvent être expliquées par les habitudes de vie favorisant la réserve cérébrale et/ou cognitive (i.e., mécanismes cérébraux et/ou processus cognitifs permettant de faire face aux effets du vieillissement normal ; Stern et al., 2019). Parmi les différents facteurs de réserve, la pratique d'activité physique est positivement associée aux performances exécutives et mnésiques (voir Bherer & Pothier, 2021). Cependant, l'ensemble des études réalisées sur les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire ne rapportent pas toujours ces effets positifs. Les bénéfices semblent être plus importants lorsque la tâche mnésique est plus complexe et plus coûteuse (Hall et al., 2001). Par exemple, seul le rappel libre, une tâche particulièrement coûteuse en ressources, bénéficie de l'activité physique comparativement à la reconnaissance et seul le rappel de mots bénéficie de l'activité physique comparativement au rappel d'images (Chodzko-Zajko et al., 1992; Woo & Sharps, 2003). Néanmoins, ces deux

[9] Cette partie a fait l'objet d'une publication dans la revue *PLoS ONE*.

Moutoussamy I., Taconnat L., Pothier K., Toussaint L., Fay S. (2022) Episodic memory and aging: Benefits of physical activity depend on the executive resources required for the task. *PLoS ONE* 17(2): e0263919. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263919

études ne font pas directement le lien avec les ressources exécutives nécessaires à la réalisation de la tâche mnésique. Les objectifs de cette première étude étaient donc d'évaluer si chez les adultes âgés, les bénéfices de l'activité physique étaient plus importants sur une tâche de rappel libre que sur une tâche de rappel indicé, moins coûteuse en ressources exécutives.

Pour cela, 74 participants répartis en deux groupes d'âge (37 adultes jeunes, M = 25.68 ans ± 5.10 et 37 adultes âgés, M = 66.54 ans ± 5.12) ont participé à l'étude. Deux tâches de mémoire épisodique ont été réalisées : une tâche de rappel libre et une tâche de rappel indicé par trigrammes impliquant chacune 20 mots (listes de mots contrebalancées entre les tâches). Les participants ont également réalisé une tâche de mise à jour en mémoire de travail (2-*Back*), fonction exécutive particulièrement impliquée dans les processus mnésiques (Clarys et al., 2009). Enfin, un questionnaire d'activité physique permettant une estimation auto-rapportée des activités sportives et de loisirs réalisées sur l'année passée a été complété (Baecke et al., 1982).

Les analyses *GLM* réalisées mettent en évidence un effet d'âge sur les capacités mnésiques et sur les performances de mise à jour en mémoire de travail ($p < .001$) en faveur des adultes jeunes. Un effet d'indiçage ($p < .001$) équivalent entre les deux groupes d'âge (interaction *ns*) est également observé, indiquant que le nombre de mots rappelés est plus élevé lors du rappel indicé que du rappel libre. De plus, les performances en rappel libre sont positivement corrélées aux performances de mise à jour en mémoire de travail, de manière significative chez les adultes âgés ($p < .05$) mais de manière marginale chez les adultes jeunes ($p = .06$). Chez le groupe d'adultes âgés, une corrélation positive est observée entre activité physique et mise à jour en mémoire de travail ($p < .01$), entre activité physique et rappel libre ($p < .01$) mais pas entre activité physique et rappel indicé (*ns*). Enfin, des analyses de régression indiquent que l'activité physique est le premier prédicteur des capacités mnésiques, face à la mise à jour en mémoire de travail (*ns*), expliquant 24% ($p < .01$) de la variance en rappel libre chez les adultes âgés.

Les résultats de cette première étude indiquent que les effets de l'activité physique dépendent à la fois du groupe d'âge mais également de la tâche de mémoire à réaliser. Chez les adultes âgés, seules les performances de la tâche de rappel libre, qui requiert le plus de ressources exécutives, dépendent du niveau d'activité physique. Les effets de l'activité physique dépendraient des ressources exécutives nécessaires à la tâche mnésique et seraient donc à prendre en considération dans les études ultérieures. Les tâches mnésiques les plus coûteuses en ressources exécutives pourraient bénéficier le plus de l'activité physique, en raison de ses bénéfices sur les capacités exécutives. De futures études devront investiguer davantage les liens entre activité physique, fonctions exécutives et mémoire afin d'étayer ces propos.

PLOS ONE

RESEARCH ARTICLE

Episodic memory and aging: Benefits of physical activity depend on the executive resources required for the task

Ilona Moutoussamy[1,2]*, Laurence Taconnat[1], Kristell Pothier[2], Lucette Toussaint[3], Séverine Fay[1]

1 Département de Psychologie, Université de Tours et de Poitiers, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR, 7295), Tours, France, **2** Département de Psychologie, Université de Tours, Psychologie des Âges de la Vie et Adaptation (EA 2114), Tours, France, **3** Département des Sciences du sport, Université de Tours et de Poitiers, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR 7295), Poitiers, France

* ilona.moutoussamy@univ-tours.fr

Check for updates

Abstract

Physical activity has beneficial effects on executive functions and episodic memory, two processes affected by aging. These benefits seem to depend on the type of memory task, but only a few studies have evaluated them despite their importance in understanding aging. This study aimed to confirm that the benefits of physical activity on episodic memory in older adults vary according to the executive resources required by the memory task, comparing free recall and cued recall. Thirty-seven young adults and 37 older adults performed two memory tasks and an updating task. The two groups had a similar level of physical activity over the preceding 12 months, assessed by a questionnaire.

Both the memory and the updating tasks were performed better by the younger than the older adults. A similar cueing effect was observed in the two groups. Physical activity was positively correlated with updating and free recall, but not with cued-recall, and only in older adults. Regression analyses indicated that physical activity accounted for 24% of the variance in free recall in older adults. Updating did not predict free recall (ns) when physical activity was entered in the analysis.

The present results show that the benefits of physical activity vary with age and episodic memory task. Only free-recall performance, which relies on updating, seems to depend on physical activity, suggesting that the executive resources required for the task play an important role in the effect of physical activity on memory performance. This should be investigated in greater depth in subsequent studies.

1. INTRODUCTION

It is well established that aging is marked by episodic memory loss (i.e., encoding, storing and retrieval of personal experiences within their temporal and spatial contexts [1]), which is one of the most common subjective concerns of older adults [2]. With the aging of the population, it is important to gain a better understanding of the episodic memory decline that accompanies aging, as well as protective factors. Craik [3] postulated that the age-related decrease in processing resources prevents the implementation of efficient encoding and retrieval processes. This difficulty can be reduced by providing environmental support, such as specific instructions, material or cues, thereby improving the memory performance of older adults and even reducing the age effect [4-7]. In fact, a memory task that provides environmental support (e.g., cued recall) requires fewer executive resources than one without such support (e.g., free recall) [8,9].

Executive functions are "a set of general-purpose control mechanisms, often linked to the prefrontal cortex of the brain, that regulate the dynamics of human cognition and action" [10], and it is widely accepted that they also decline with aging [11]. Several meta-analyses confirm that advancing age has an influence on the executive functions in Miyake et al.'s model [12]: updating, inhibition and flexibility [13-15]. The executive hypothesis of aging suggests that cognitive changes are the result of an age-related decline in executive functions [16] due to their involvement in cognitive processes, including memory, especially in older adults compared to younger adults [17,18]. Some studies suggest that the memory strategy used is linked to executive functioning during aging (e.g., [19,20]). For example, in the retrieval phase of a Remember-Know paradigm, participants have to say if they remember the word from the study phase and in what context (i.e., *Remember* responses considered as an episodic recollection), or if they remember the word but without any encoding details (i.e., *Know* responses, based on familiarity). Bugaiska and collaborators [21] found a correlation only between executive performance and *Remember* responses, involving a memory retrieval strategy related to the specific context. More specifically, updating, as measured by the N-Back task, was the executive measure that correlated most with *Remember* responses, in both younger and older adults, but particularly the latter [22]. Moreover, updating has been found to be the executive measure that best explains the variance observed in the age effect on memory and *Remember* responses, which could be due to better initiation of encoding and retrieval strategies such as memory search and checking the correctness of the answer [22]. *Know* responses, which are based on familiarity, do not appear to be related to executive functioning. Finally, prefrontal grey matter volume and activation have been linked to the use of self-initiated memory strategies by older adults [23,24].

Thus, the well-established age-related differences in memory performance could be explained by differences in executive functioning (e.g., [17,18,25-27] but for a review see [8]). Older adults seem to have difficulty spontaneously implementing effective memory strategies, because they require more executive functions [28-30] to select, monitor and organize information in order to improve memory [31].

The memory performance of older adults varies widely, due to individual differences notably related to cognitive reserve [32], whereby external factors, such as educational level, leisure or physical activities, optimize cognitive performance despite brain changes. Researchers have been interested for some time in how the cognitive skills of older adults in particular benefit from physical activity, defined as "any bodily movement produced by skeletal muscle that results in energy expenditure" [33]. Although many studies have reported the benefits of physical activity on cognition, and especially on executive functions (e.g., [34]), they have yielded conflicting results. This can be explained by methodological differences; for example, interventional studies, which are widely used, compare performance before and after physical exercise [35,36], while cross-sectional studies evaluate physical activity using actimetry [37,38] or questionnaires [39-43] to compare performance with that of a control group. Physical activity has been shown to have a positive influence on executive functions such as updating, inhibition and flexibility [44-46], as confirmed by a recent meta-analysis of interventional studies [47]. Several meta-analyses of interventional studies tend to confirm that physical activity slows down executive and memory decline in older adults (e.g., [34, 48, 49]), but others have yielded more mixed results (e.g., [50,51]). These discrepancies can be explained by study design, with variable durations and types of intervention (see [52] for a chapter devoted to studies by type of physical activity). However, the regularity of physical activity, reflecting lifestyle or habits, has been shown to have benefits on cognition (e.g., [43]). It is difficult to estimate the impact of regular physical activity through interventional or cross-sectional studies using actimetry, as interventional studies are carried out over a few weeks or months, while actimetry is used over a very limited period and could also lead to changes in the behaviour of the person wearing the device. A physical activity questionnaire could be an interesting alternative, providing a rapid way of estimating the level of physical activity over a long time-span.

Some studies have tried to explain the divergent findings about the benefits of physical activity during aging by task complexity. Chodzko-Zajko et al. [53] observed a difference between older exercisers with low and high fitness levels (based on their cardiovascular fitness level) in three memory tasks - an auditory free-recall task and two recognition tasks (frequency and location) -

that differed in terms of environmental support and therefore in the cognitive resources required. Recognition performance was comparable between groups, but free-recall performance differed significantly, with better performance by the high-level fitness group. Woo and Sharps [54] compared the performance of younger and older adults with low and high levels of exercise (based on self-reported physical activity) on a free-recall task with 40 items (pictures or words of common objects). Results showed an interaction between exercise and item type (word vs picture) only in older adults. In other words, older adults with a low level of exercise remembered fewer words than pictures, but this difference was not observed in higher exercisers. According to Woo and Sharps [54], this difference could be explained by the level of support provided by the stimulus; pictures provide sufficient environmental support to enable older adults to remember them correctly, whatever their level of exercise, whereas words, which do not provide this support and need more cognitive resources, are recalled better by people with a higher level of exercise. In other words, exercise does not seem to have an overall effect on episodic memory, but only on the most resource-demanding tasks in which appropriate processes must be self-initiated. However, none of these studies investigated whether the effect of physical activity on more complex tasks could be mediated by the executive resources required.

The current study aimed to determine whether the benefits of physical activity on episodic memory during aging depend on the executive resources required by the task, especially updating, by comparing free-recall and cued-recall performance. We hypothesized first that both memory and updating tasks would be performed better by younger than older adults. Secondly, we expected that updating would be correlated more with free recall than with cued recall, indicating that more cognitive resources are needed for the former. Thirdly, we predicted that physical activity would have greater benefits for older than younger adults, and for free recall than cued recall because of the greater cognitive resources required to retrieve the item and its context without environmental support. Finally, we expected that physical activity would be the strongest predictor of free-recall performance in older adults, because of its benefits on updating, which is particularly involved in this task.

2. METHOD

2.1. PARTICIPANTS AND BACKGROUND MEASURES

We conducted *a priori* analyses using GPower 3.1 to test the differences between our groups (two age categories; inter-group factor) and our memory tasks (two memory tasks; intra-group factor), with a medium effect size ($f = 0.25$), an alpha of 0.05 and a repeated measures correlation

of 0.50. The results indicated that we needed to include at least 54 participants to achieve a power of 0.95.

Seventy-four healthy French-speaking adults took part in this experiment. They were divided into two groups: 37 younger adults (20-40 years old) and 37 older adults (60-80 years old). All the participants were screened for their level of education (number of years of education), vocabulary (Mill-Hill, [55]), depression and anxiety (HADS, [56]), and the older adults completed the Mini Mental State Examination (MMSE, [57]). Eligible participants were selected according to the following criteria: (1) absence of symptoms of depression or anxiety (cut-off for exclusion > 11 on one of the two subscales of the HADS), (2) to be free of medication that could affect intellectual abilities, (3) a score greater than 27 on the MMSE to reduce the risk of including older participants with cognitive dysfunction. Background measures and comparisons between groups are reported in **Table 1**. Independent t-tests were used to compare characteristics of younger and older adults. The younger adults had a higher educational level and the older adults had a higher vocabulary level, these two variables were therefore included in the statistical analyses in order to control their potential effects on our measurements. The two groups did not differ in levels of anxiety and depression. Male to female ratio was compared using a Pearson's Chi-squared test, indicating similarity between our two groups: 56% of younger adults and 54% of older adults were female [Pearson $Chi^2 = 0.05$; $p = .82$]. This study was approved by the ethics committee of the University of Tours (France), and all participants signed a consent form.

Table 1. Means (and SD) of participants' characteristics by age group

	Younger adults (n = 37)	**Older adults (n = 37)**	t_{72}
	Mean (SD)	**Mean (SD)**	
Age (years)	25.68 (5.10)	66.54 (5.12)	
MMSE (score/30)	/	28.30 (1.02)	
Educational level (years)	12.62 (2.19)	11.22 (3.56)	2.04, p = .044
Vocabulary (score/34)	20.46 (5.08)	23.95 (6.16)	- 2.65, p = .009
Anxiety level (score/21)	4.78 (3.14)	3.91 (2.85)	1.24, p = .219
Depression level (score/21)	5.05 (3.11)	3.97 (2.91)	1.54, p = .127

2.2. MATERIAL

2.2.1. EPISODIC MEMORY TASKS

Participants performed two counterbalanced memory tasks, differing only at the retrieval stage (free recall vs cued recall). We created two lists of 20 common words, containing 4 to 9 letters

and differing in the first 3 letters, and which can be completed by at least 5 words including the target word. Words in the two lists were similar in terms of length (6.15 ± 1.18 letters in the first list and 6.05 ± 1.19 letters in the second; $t_{38} = -0.22$, $p = .79$), frequency of use (9406 ± 12716 for the first list and 10161 ± 8933 for the second; $t_{38} = 0.27$, $p = .83$) [58]. A sample of 181 adults, aged 20 to 69 (mean age = 28.47 ± 12.13) were asked to indicate the concreteness of each word on a scale from 1 (very abstract) to 5 (very concrete). The concreteness is also equivalent between the two lists (3.48 ± 1.31 for the first list and 3.73 ± 1.23 for the second; $t_{38} = 0.63$, $p = .53$). The two lists were counterbalanced across memory tasks to avoid a list effect.

2.2.2. UPDATING MEASURE

Participants performed the 2-Back task [59] to measure updating. Thirty letters were presented one at a time, and the participants had to decide whether the letter presented was the same as the one presented 2 letters before. The score was the number of correct responses (maximum 28).

2.2.3. HABITUAL PHYSICAL ACTIVITY INDEX

To assess habitual physical activity, we used the Baecke questionnaire [60], which measures three domains of physical activity over the last 12 months, yielding three indices: IAT (index of physical activity at work, 8 questions), IAS (index of physical activity and sports, 2 questions), and IAL (index of leisure activity such as walking, 3 questions). The current study focused on older retired adults, so the IAT does not provide data discriminating between our older participants. Thus, like Bigard et al. [61], we used only two indices of habitual physical activity, IAS and IAL, Questions and calculation formulae to obtain these two indices are reported in **S1 Table**. The physical activity intensity codes for Q1 (**S1 Table**) were based on the estimated energy expenditure of the activity and classified into the categories defined by Durnin and Passmore [62]. The habitual physical activity index corresponds to the sum of IAS and IAL; the higher the index, the more the participant engages in daily physical activity.

Each index of habitual physical activity showed a great reliability on a three months test-rest ($r = 0.81$ for IAS and $r = 0.74$ for IAL). Finally, different authors correlated each index with finer measures. IAS was positively correlated with weekly energy expenditure estimated by another questionnaire [63], with physiological parameters such as VO_2 max and with muscular endurance [61]. IAS was also negatively correlated to fat mass [61]. Concerning IAL, a positive correlation was found with VO_2 max and a negative correlation with BMI (body mass index, [61]). Thus, this questionnaire has many times been correlated with objective measures representing a

person's physical condition, which makes it an interesting tool for measuring habitual physical activity.

2.3. PROCEDURE

Memory tasks were performed using the following procedure. Encoding and interference phases were similar in the two tasks. In the encoding phase, participants were asked to read each word aloud and try to memorise it. A fixation cross appeared for 1000 ms to prepare the participant for the word, then the word was presented for 2000 ms followed by a blank screen for 3000 ms. Words were presented randomly. Participants performed a short interference task at the end of this phase (counting backwards for 20 seconds) to prevent any recency effect. The procedure for the retrieval phase differed in the two tasks; in the free-recall task, participants were asked to say as many words as they could remember, and in the cued-recall task, the first three letters (word-stem) of each encoded word were displayed to guide retrieval. For this task, a fixation cross was displayed for 1000 ms, followed by the word-stem for 1000ms. A question mark was then displayed for 4000 ms and participants were asked to complete the word-stem with a word presented during the encoding phase. Each memory task can be completed in approximately five minutes. These two memory tasks were counterbalanced: in each age group, half of the participants started with free recall and the other half with cued recall. Five minutes of break and exchanges separated the two memory tasks to limit interference. The dependent variable was the percentage of correctly recalled words in each memory task (free recall and cued recall). In the 2-back task, thirty letters were presented aloud, one at a time, every 5 seconds. For each letter, participants had to answer "yes" if the letter presented was the same as the one presented two letters before or "no" otherwise. Five minutes are needed to complete this task.

The procedure was carried out in the following order: signing a consent form, MMSE (older adults only), then the cognitive tasks (memory and updating), and finally the physical activity questionnaire, Mill-Hill and HADS.

2.4. STATISTICAL ANALYSES

Statistical analyses were conducted using Statistica 13.3 software. To analyse differences in recall depending on age and memory task, a 2 (age-group) x 2 (retrieval task) GLM (with educational and vocabulary level as covariates) was conducted on the percentage of correctly recalled words. Next, to analyse the effect of age on updating performance and on physical activity, one-way ANCOVAs were carried out. Educational and vocabulary level were added as covariates in both of these ANCOVAs to avoid bias related to the differences between our two

groups. Effect sizes for significant effects and interactions were calculated using partial eta squared (η_p^2). Correlational analyses (controlling for age) of habitual physical activity and cognitive measures (cued recall, free recall and updating) were conducted separately in each age group to assess associations between these variables. Finally, hierarchical linear regression analyses were performed to establish the priority of predictors (physical activity and updating) of memory task performance. Hierarchical regression is sometimes criticized for adding its potential for overfitting when too many predictors and not enough observations are included in the analysis [64]. However, it seems that having between 10 and 15 observations per predictor would allow a good estimation. Below these 10 observations per predictor, the estimates may be biased [64, 65]). In our case, we had only two predictors and 37 participants, or more than 15 observations per predictor. Thus, adding physical activity in our regressions allows us to improve the explanation of older adult's free-recall performance.

3. RESULTS

3.1. AGE EFFECT ON MEMORY, UPDATING TASKS, AND ON PHYSICAL ACTIVITY INDEX

Means and standard deviations for the two memory tasks, updating and habitual physical activity index for each age group are presented in **Table 2**. The 2 (age-group) x 2 (retrieval task) GLM (with educational and vocabulary level as covariate) confirmed the main effect of age group on memory performance, F (1,70) = 26.90, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.28$, indicating that older participants remembered significantly fewer words than younger participants. The results also revealed a retrieval task effect on memory performance, F (1,70) = 4.90, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.06$, participants recalling significantly more words in cued recall than in free recall, suggesting that the latter is more difficult. No interaction was found between age group and retrieval task, F (1,70) = 1.09, $p = .30$. In other words, the effect of age group was similar for cued recall and free recall, and cueing had similar benefits for younger and older participants.

A one-way ANCOVA was conducted on the 2-Back score to analyse the effect of age on updating. We found an age-group effect on updating performance, F (1,70) = 11.03, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.14$, with higher scores for the younger than the older group.

Then, the ANCOVA on physical activity index revealed that habitual physical activity level (total index) was similar in the two age groups, F (1,70) = 0.81, $p = .37$, $\eta_p^2 = 0.01$. More precisely, analyses did not show an age-effect on IAS, F (1,70) = 0.09, $p = .76$, $\eta_p^2 = 0.00$, but

showed a significative difference in IAL between our two groups, F (1,70) = 4.22, $p < .05$, η_p^2 = 0.06.

Table 2. Means (and SD) for the two memory tasks, updating and habitual physical activity index in each age group (younger vs. older adults).

	Younger adults	Older adults
Free recall (percentage of correctly recalled words)	45.54 (12.79)	30.67 (11.91)
Cued recall (percentage of correctly recalled words)	70.54 (11.71)	60.00 (17.24)
Updating	24.97 (1.24)	23.32 (2.29)
Habitual physical activity index (total index)	6.08 (2.30)	6.60 (2.65)
IAS (index of physical activity and sports)	3.30 (2.17)	3.51 (2.46)
IAL (index of leisure activity)	2.78 (0.71)	3.10 (0.78)

3.2. CORRELATIONAL ANALYSES

The main objective was to understand the role of our variables (updating, physical activity) in our principal outcome (memory performance). Therefore, correlational analyses (with age, education and vocabulary partialled out) of habitual physical activity and cognitive measures (cued recall, free recall and updating) were conducted separately in each age group. In both groups, updating performance (i.e., 2-Back score) was marginally or significantly positively correlated with the proportion of words recalled in the free-recall task (r = 0.32, p = .06 for younger adults and r = 0.41, p = .02 for older adults), indicating that the higher the 2-Back score, the greater the proportion of words recalled, whereas these correlations failed to reach significance in the cued-recall task (r = 0.23, p = .18 for younger adults and r = 0.14, p = .41 for older adults). Thus, only the free-recall task was linked to updating, which supports the idea that free recall depends more on cognitive resources than cued recall, particularly in older adults. Habitual physical activity index was positively correlated with the percentage of words recalled in the free-recall task (r = 0.53, p = .001) and with updating performance (r = 0.57, $p < .001$) only in older adults (in young adults, r = 0.06, p = .75 for physical activity and free-recall performance; r = 0.15, p = .40 for physical activity and updating performance). The latter results indicate that the higher the level of physical activity, the better the performance of older adults on free recall and updating. Finally, the habitual physical activity index was not significantly correlated with cued recall in either younger (r = 0.12, p = .49) or older adults (r = 0.23, p = .18).

3.3. Regression analyses

For older adults, the previous analyses show that only performance on the free-recall task was correlated with physical activity and updating. Stepwise regression analysis was carried out to determine which of the three following factors (age, physical activity and updating) was the best predictor of free-recall performance in older adults. First, we calculated the percentage of variance explained by each factor when entered alone: age accounted for 3.21% of the variance observed in free recall ($\beta = -.18$; $t_{35} = -1.08$, $p = .29$), physical activity accounted for 24.15% of the variance ($\beta = .49$; $t_{35} = 3.33$, $p = .002$) and updating performance explained 13.63% ($\beta = .37$; $t_{35} = 2.35$, $p = .02$). When entered together, only physical activity proved to be a significant predictor of the variance related to free-recall performance. The variance explained by updating was reduced to a non-significant 1.23% ($\beta = .13$; $t_{34} = 0.75$, $p = .46$). Thus, the variance related to updating on free-recall performance was reduced by 90.97% after partialling out physical activity.

4. Discussion

The aim of this study was to examine whether the benefits of physical activity on memory during aging depend on the amount of executive resources required by the task. First of all, the results confirm the well-established age-related memory decline (for a review, see [66]), younger participants recalling more words than older participants, in both free-recall and cued-recall tasks. They also revealed a cueing effect, cued recall leading to better performance than free recall. These results confirm that free recall is more difficult than cued recall. No significant interaction with age group was found, both groups performing better in cued recall than free recall. While some studies have found a greater benefit of cueing for older groups, consistent with the environmental support hypothesis (e.g., [6,7]), our study found a similar benefit for the two age groups. It is possible that the first three letters of the target word used for cued recall did not provide sufficient support to further improve the performance of the older adults. Indeed, Angel et al. [67] found a significant age effect on cued recall when using a 3-letter but not a 4-letter word-stem, indicating that the amount of support given during retrieval modulates the effects of age on episodic memory, and therefore that certain cues do not lead to a greater improvement of the performance of older than younger adults. However, in the present study, we wished to ensure that a free-recall memory task was more difficult than a cued-recall task, which was confirmed.

Our main aim was to understand whether the involvement of physical activity in the performance of older adults differed according to the executive resources required by the memory task. To test this hypothesis, we needed to confirm that one of the two memory tasks required more executive resources than the other. As expected, only the free-recall task was positively correlated with the updating task, marginally in younger adults and significantly in older adults, indicating that the more executive resources, the better the free-recall performance. However, our results show that the correlation between updating and free recall was only marginal in young adults. These results are in accord with those of Bouazzaoui et al.'s [18], who found that executive index was not correlated with free-recall task or cued-recall task (respectively, r = -.03 and r = .01) in young adults unlike what was observed in older adult. However, in line with the environmental support hypothesis [3], the cues provided during retrieval seem to reduce the involvement of self-initiated strategies and therefore the involvement of updating in memory performance. More precisely, Clarys et al. [22] found that updating is correlated with *Remember* responses and not with *Know* responses, suggesting that updating could be implicated in contextualization in episodic memory. Another study highlighted a modification of the *Remember* responses (and not the *Know* responses) when updating processes were already involved in another task, which would confirm that the participants did not succeed in contextualizing the item [68]. The current study highlighted a greater involvement of updating in free recall than in cued recall, which is the task requiring to retrieve the item and its context. The results also revealed different patterns of correlations between age group and memory task, although the level of physical activity was similar in the two groups. For the younger adults, no significant link was found between physical activity and updating or memory tasks, could suggest that physical activity did not play a primary role in the quality of memory. Studies investigating this issue have yielded divergent results; some found benefits of physical activity on cognitive, and particularly executive functions, in younger adults (e.g., [69,70] but see [71] for a review), while others found a benefit only in older adults (e.g., [37, 72] but see [73] for a review with limited evidence for the link between physical activity and cognition in younger adults), with weaker or even non-existent benefits in younger adults. In other words, executive performance and cerebral integrity are preserved in young adults, which makes it difficult to demonstrate the beneficial effects of physical activity, unlike in older adults. Thus, even if there are beneficial effects of physical activity on executive functions in younger adults, this may not be a discriminant factor in executive performance. However, in the older adults, the population of interest for this study, a positive correlation was found between physical activity and updating, indicating that older adults with a higher level of physical activity would also be those with the

best updating performance (e.g., [46]). Performance on the free-recall task was also positively correlated with physical activity, indicating that older adults who engage more in physical activity perform better on a difficult memory task such as free recall. Thus, in accordance with Chodzko-Zajko et al. [52] and Woo and Sharps [53], we found that the benefits of physical activity in older adults were particularly noticeable in the free-recall task, which does not provide any environmental support and requires more updating.

In view of the results of the correlation analysis, we focused on the performance of older adults in the free-recall task only, since no significant correlation was found for cued recall. Both physical activity and updating explained free-recall performance (24.13% and 13.63% of the variance of recall respectively), but when analysed together, only physical activity remained significant, and updating was reduced to a non-significant 1.23% of the variance. This indicates that updating ability no longer influenced free-recall performance after controlling for the level of physical activity. We postulate that updating plays a decisive role in the link between physical activity and memory; physical activity could have benefits on updating, which in turn would lead to better memorization. Many studies have highlighted the beneficial effect of physical activity on executive functions (e.g., [34,48,49]), which are more involved in free recall due to the lack of environmental support and are well known for their role in supporting memory performance during aging [17,18]. These results are consistent with the hypothetical explanatory model of Loprinzi [74], in which physical activity has an effect on various functions, in particular executive functions, which in turn influence memory performance. Another explanation to consider is the possible existence of a two-way link between regular physical activity and executive function. People with a higher level of executive function would be more apt to perform regular physical activities (and most importantly, to persevere in this healthy behavior), which in turn serves to improve executive functioning [75,76]. Thus, in our results, regular sporting older adults would be those who already have an important executive function, which would have been further strengthened thereafter.

Overall, the present results would confirm the positive link between physical activity and cognitive performance of elderly adults (e.g., [77]). They also highlight the importance of updating in the beneficial effects of physical activity on memory performance. Accordingly, we can assume that the more older adults engage in physical activity, the better their updating performance and therefore their memory performance in the most resource-demanding tasks. No link was found between physical activity and memory in younger adults, in accordance with other studies (e.g., [37]). Executive functions are less important in the memory performance of

younger adults [17,18]. Thus, while physical activity improves the executive functions involved in self-initiated memory processes in older adults, it is not surprising that no link was found between physical activity and memory in younger adults. These results need to be confirmed by further studies including different executive measures. Indeed, while updating seems to be the main executive function involved in self-initiated retrieval in episodic memory [22,66], having a more general view with an executive index or identifying the role of each executive function would help understand the benefits of physical activity. Thus, further studies are needed to identify not only the executive functions on which physical activity acts, but also the type of tasks where these beneficial effects are visible. In addition, other variables could influence executive and / or memory performance such as many other cognitive reserve factors (educational level, social environment, sleep, curiosity, etc.) or even IQ. Educational level corresponds to one of the most often factor used to represent and study cognitive reserve and is particularly important in healthy behavior changes and adherence [78]. Vocabulary level could also influence the cognitive performance due to its known role in IQ and memory, but also the link between physical activity and language [79]. However, the results found here showed that, even under the control of educational level and vocabulary, the declared physical activity is still the factor most linked to the free-recall performance of the older adults, which allows us to partially rule out these hypotheses. Finally, we acknowledge the limitations of the physical activity questionnaire (e.g., self-reported responses based on memory), but this measure seems to provide the best way to estimate the regularity of physical activity. It is important to validate the use of questionnaire measuring physical activity and to generalize this use. In fact, epidemiological studies, around public health on a very large population, do not allow us to easily use objective measurements (e.g., VO_2 max or actimetry). The questionnaire used must be easy for everyone to understand, quick and easy to use – criteria fulfilled by Baecke questionnaire [60]. Despite this, it is possible that the actual intensity differs between the two groups and that an objective measurement could have perhaps revealed a difference, over a shorter period (i.e., a greater intensity of physical activity in younger adults than in older adults, generally practicing less intense sports), but it is important to note that the important results are still highlighted in the group of the elderly. Objective and subjective measures should not thus be put in opposition or in competition with each other but should rather be seen as complementary. In our case, the questionnaire we used was correlated to different objective measures, including cardiovascular health (VO_2 max), confirming its validity [60].

In sum, aging is marked by episodic memory changes, which are greater when the memory task is more complex and requires more executive resources. Physical activity appears to be

positively associated with updating in old age. It therefore seems logical to think that cognitive tasks requiring more executive resources are the most sensitive to physical activity. In fact, physical activity is a better predictor of free-recall performance than updating, and the latter could mediate the beneficial effects of physical activity on episodic memory. Thus, we conclude that the benefits of physical activity vary with age and type of episodic memory task. It seems that the executive resources required for the task play an important role in the effects of physical activity on memory performance and thus merit further investigation in subsequent studies.

References

1. Tulving E. Episodic Memory: From Mind to Brain. Annual Review of Psychology. 2002;53(1):1-25. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135114
2. Tannenbaum C. Older women's health priorities and perceptions of care delivery: results of the WOW health survey. Canadian Medical Association Journal. 2005;173(2):153-159. https://doi.org/10.1503/cmaj.050059
3. Craik FIM. Human memory and cognitive capabilities, mechanisms and performances. In F. Klix &. H. Hagendorf (Eds.). Amsterdam: Elsevier North-Holland;1986. A functional account of age differences in memory; p. 409-422).
4. Burger L, Uittenhove K, Lemaire P, Taconnat L. Strategy difficulty effects in young and older adults' episodic memory are modulated by inter-stimulus intervals and executive control processes. Acta Psychologica. 2017;175:50-59. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.02.003
5. Danckert S, Craik F. Does aging affect recall more than recognition memory? Psychology and Aging. 2013;28(4):902-909. https://doi.org/10.1037/a0033263
6. Craik FIM, McDowd JM. Age Differences in Recall and Recognition. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition. 1987;13(3):474-479
7. Froger C, Taconnat L, Landré L, Beigneux K, Isingrini M. Effects of level of processing at encoding and types of retrieval task in mild cognitive impairment and normal aging. Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology. 2009;31(3):312-321. https://doi.org/10.1080/13803390802112554
8. Isingrini M, Taconnat L. Mémoire épisodique, fonctionnement frontal et vieillissement. Revue Neurologique. 2008;164:S91-S95. https://doi.org/10.1016/S0035-3787(08)73297-1
9. Zacks RT, Hasher L, Li KZH. Human memory. In: Craik, FIM, Salthouse, TA (Eds.). The handbook of aging and cognition. 2nd ed. Mahwah (NJ): Lawrence Erlbaum Associates Publishers; 2000. p 293–357
10. Miyake A, Friedman N. The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions. Current Directions in Psychological Science. 2012;21(1):8-14. https://doi.org/10.1177/0963721411429458
11. Ruscheweyh R, Deppe M, Lohmann H, Wersching H, Korsukewitz C, Duning T et al. Executive performance is related to regional gray matter volume in healthy older individuals. Human Brain Mapping. 2013;34(12):3333-3346. https://doi.org/10.1002/hbm.22146
12. Miyake A, Friedman N, Emerson M, Witzki A, Howerter A, Wager T. The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent

Variable Analysis. Cognitive Psychology. 2000;41(1):49-100. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

13. Bopp K, Verhaeghen P. Aging and n-Back Performance: A Meta-Analysis. The Journals of Gerontology: Series B. 2018;00(00):1-12. https://doi.org/10.1093/geronb/gby024

14. Verhaeghen P, De Meersman L. Aging and the Stroop effect: A meta-analysis. Psychology and Aging. 1998;13(1):120-126. https://doi.org/10.1037/0882-7974.13.1.120

15. Wasylyshyn C, Verhaeghen P, Sliwinski M. Aging and task switching: A meta-analysis. Psychology and Aging. 2011;26(1):15-20. https://doi.org/10.1037/a0020912

16. West R. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. Psychological Bulletin. 1996;120(2):272-292. https://doi.org/10.1037/0033-2909.120.2.272

17. Bouazzaoui B, Fay S, Taconnat L, Angel L, Vanneste S, Isingrini M. Differential involvement of knowledge representation and executive control in episodic memory performance in young and older adults. Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale. 2013;67(2):100-107. https://doi.org/10.1037/a0028517

18. Bouazzaoui B, Angel L, Fay S, Taconnat L, Charlotte F, Isingrini M. Does the greater involvement of executive control in memory with age act as a compensatory mechanism?. Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale. 2014;68(1):59-66. https://doi.org/10.1037/cep0000005

19. Bouazzaoui B, Isingrini M, Fay S, Angel L, Vanneste S, Clarys D et al. Aging and self-reported internal and external memory strategy uses: The role of executive functioning. Acta Psychologica. 2010;135(1):59-66. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.05.007

20. Jones S, Nyberg L, Sandblom J, Stigsdotter Neely A, Ingvar M, Magnus Petersson K et al. Cognitive and neural plasticity in aging: General and task-specific limitations. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2006;30(6):864-871. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.012

21. Bugaiska A, Clarys D, Jarry C, Taconnat L, Tapia G, Vanneste S et al. The effect of aging in recollective experience: The processing speed and executive functioning hypothesis. Consciousness and Cognition. 2007;16(4):797-808. https://doi.org/10.1016/j.concog.2006.11.007

22. Clarys D, Bugaiska A, Tapia G, Baudouin A. Ageing, remembering, and executive function. Memory. 2009;17(2):158-168. https://doi.org/10.1080/09658210802188301

23. Kirchhoff B, Gordon B, Head D. Prefrontal gray matter volume mediates age effects on memory strategies. NeuroImage. 2014;90:326-334. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.052

24. Petrides M. The Mid-ventrolateral Prefrontal Cortex and Active Mnemonic Retrieval. Neurobiology of Learning and Memory. 2002;78(3):528-538. https://doi.org/10.1006/nlme.2002.4107

25. Butler K, Mcdaniel M, Dornburg C, Price A, Roediger H. Age differences in veridical and false recall are not inevitable: The role of frontal lobe function. Psychonomic Bulletin & Review. 2004;11(5):921-925. https://doi.org/10.3758/BF03196722

26. Crawford J, Bryan J, Luszcz M, Obonsawin M, Stewart L. 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. 2000;7(1):9-31. https://doi.org/10.1076/anec.7.1.9.806

27. Troyer A, Graves R, Cullum C. Executive functioning as a mediator of the relationship between age and episodic memory in healthy aging. Aging, Neuropsychology, and Cognition. 1994;1(1):45-53. https://doi.org/10.1080/09289919408251449

28. Guerrero Sastoque L, Bouazzaoui B, Burger L, Froger C, Isingrini M, Taconnat L. Optimizing memory strategy use in young and older adults: The role of metamemory and internal strategy use. Acta Psychologica. 2019;192:73-86. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.11.002

29. Taconnat L, Clarys D, Vanneste S, Bouazzaoui B, Isingrini M. Aging and strategic retrieval in a cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. Brain and Cognition. 2007;64(1):1-6. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.09.011

30. Taconnat L, Raz N, Toczé C, Bouazzaoui B, Sauzéon H, Fay S et al. Ageing and organisation strategies in free recall: The role of cognitive flexibility. European Journal of Cognitive Psychology. 2009;21(2-3):347-365. https://doi.org/10.1080/09541440802296413

31. Blumenfeld R, Ranganath C. Prefrontal Cortex and Long-Term Memory Encoding: An Integrative Review of Findings from Neuropsychology and Neuroimaging. The Neuroscientist. 2007;13(3):280-291. https://doi.org/10.1177/1073858407299290

32. Stern Y. What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. Journal of the International Neuropsychological Society. 2002;8(3):448-460. https://doi.org/10.1017/S1355617702813248

33. Caspersen CJ, Powell KE, Christenson GM. Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research. Public Health Rep. 1985;100(2):126-131.

34. Colcombe S, Kramer A. Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults. Psychological Science. 2003;14(2):125-130. https://doi.org/10.1111/1467-9280.t01-1-01430

35. Nouchi R, Taki Y, Takeuchi H, Sekiguchi A, Hashizume H, Nozawa T et al. Four weeks of combination exercise training improved executive functions, episodic memory, and processing speed in healthy elderly people: evidence from a randomized controlled trial. AGE. 2013;36(2):787-799. https://doi.org/10.1007/s11357-013-9588-x

36. Ruscheweyh R, Willemer C, Krüger K, Duning T, Warnecke T, Sommer J et al. Physical activity and memory functions: An interventional study. Neurobiology of Aging. 2011;32(7):1304-1319. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2009.08.001

37. Hayes S, Alosco M, Hayes J, Cadden M, Peterson K, Allsup K et al. Physical Activity Is Positively Associated with Episodic Memory in Aging. Journal of the International Neuropsychological Society. 2015;21(10):780-790. https://doi.org/10.1017/S1355617715000910

38. Wilbur J, Marquez D, Fogg L, Wilson R, Staffileno B, Hoyem R et al. The Relationship Between Physical Activity and Cognition in Older Latinos. The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences. 2012;67(5):525-534. https://doi.org/10.1093/geronb/gbr137

39. Chan A, Ho Y, Cheung M, Albert M, Chiu H, Lam L. Association Between Mind-Body and Cardiovascular Exercises and Memory in Older Adults. Journal of the American Geriatrics Society. 2005;53(10):1754-1760. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53513.x

40. Gajewski P, Falkenstein M. Lifelong physical activity and executive functions in older age assessed by memory based task switching. Neuropsychologia. 2015;73:195-207. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.04.031

41. Gajewski PD, Falkenstein M. Long-term habitual physical activity is associated with lower distractibility in a Stroop interference task in aging : Behavioral and ERP evidence. Brain and Cognition. 2015;98:87-101. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.06.004

42. Rouillard M, Audiffren M, Albinet C, Ali Bahri M, Garraux G, Collette F. Contribution of four lifelong factors of cognitive reserve on late cognition in normal aging and Parkinson's disease.

Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology. 2017;39(2):142-162. https://doi.org/10.1080/13803395.2016.1207755

43. Weuve J. Physical Activity, Including Walking, and Cognitive Function in Older Women. JAMA. 2004;292(12):1454. https://doi.org/10.1001/jama.292.12.1454

44. Albinet CT, Boucard G, Bouquet CA, Audiffren M. Increased heart rate variability and executive performance after aerobic training in the elderly. European Journal of Applied Physiology. 2010;109(4):617-624. https://doi.org/10.1007/s00421-010-1393-y

45. Boucard G, Albinet CT, Bugaiska A, Bouquet CA, Clarys D, Audiffren M. Impact of Physical Activity on Executive Functions in Aging : A Selective Effect on Inhibition Among Old Adults. Journal of Sport and Exercise Psychology. 2012;34(6):808-827. https://doi.org/10.1123/jsep.34.6.808

46. Tsai C, Pan C, Chen F, Tseng Y. Open- and Closed-Skill Exercise Interventions Produce Different Neurocognitive Effects on Executive Functions in the Elderly: A 6-Month Randomized, Controlled Trial. Frontiers in Aging Neuroscience. 2017;9. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00294

47. Xiong J, Ye M, Wang L, Zheng G. Effects of physical exercise on executive function in cognitively healthy older adults : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. International Journal of Nursing Studies. 2021;114:103810. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2020.103810

48. Barha CK, Davis JC, Falck RS, Nagamatsu LS, Liu-Ambrose T. Sex differences in exercise efficacy to improve cognition : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in older humans. Frontiers in Neuroendocrinology. 2017;46:71-85. https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2017.04.002

49. Kelly ME, Loughrey D, Lawlor BA, Robertson IH, Walsh C, Brennan S. The impact of exercise on the cognitive functioning of healthy older adults : A systematic review and meta-analysis. Ageing Research Reviews. 2014;16:12-31. https://doi.org/10.1016/j.arr.2014.05.002

50. Sanders LMJ, Hortobágyi T, la Bastide-van Gemert S, van der Zee EA, van Heuvelen MJG. Dose-response relationship between exercise and cognitive function in older adults with and without cognitive impairment : A systematic review and meta-analysis. PLOS ONE. 2019;14(1):e0210036. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210036

51. Young J, Angevaren M, Rusted J, Tabet N. Aerobic exercise to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2015;4 https://doi.org/10.1002/14651858.CD005381.pub4

52. Bherer L, Pothier K. Physical Activity and Exercise. In: Strobach T., Karbach J. (eds) Cognitive Training. Springer, Cham;2021 p. 319-330 https://doi.org/10.1007/978-3-030-39292-5_22

53. Chodzko-Zajko WJ, Schuler P, Solomon J, Heinl B, Ellis NR. The Influence of Physical Fitness on Automatic and Effortful Memory Changes in Aging. The International Journal of Aging and Human Development. 1992;35(4):265-285. https://doi.org/10.2190/UJAQ-4LK5-2WAN-11DL

54. Woo E, Sharps MJ. Cognitive aging and physical exercise. Educational Gerontology. 2003;29(4):327-337. https://doi.org/10.1080/713844341

55. Deltour JJ. Echelle de vocabulaire Mill Hill de JC Raven. Adaptation française et normes comparées du Mill Hill et du Standard Progressive Matrice (PM 38) Manuel. Braine-le-Château, France : L'application des techniques modernes, 1993.

56. Zigmond AS, Snaith RP. The Hospital Anxiety and Depression Scale. Acta Psychiatrica Scandinavica. 1983;67(6):361-370. https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x

57. Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. “Mini-mental state”. Journal of Psychiatric Research. 1975;2(3):189-198. https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6

58. Content A, Mousty P, Radeau M. Brulex. Une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. L’année psychologique, 1990;90(4):551-566. https://doi.org/10.3406/psy.1990.29428

59. Kirchhoff BA, Gordon BA, Head D. Prefrontal gray matter volume mediates age effects on memory strategies. NeuroImage. 2014;90:326-334. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.052

60. Baecke JA, Burema J, Frijters JE. A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. The American Journal of Clinical Nutrition. 1982;36(5):936-942. https://doi.org/10.1093/ajcn/36.5.936

61. Bigard A, Duforez F, Portero P, Guezennec C. Détermination de l'activité physique par questionnaire: validation du questionnaire autoadministrable de Baecke. Science & Sports. 1992;7(4):215-221. https://doi.org/10.1016/s0765-1597(05)80093-0

62. Durnin J, Passmore R. Energy, work and leisure. London: Heinemann educational Books; 1967.

63. Cauley J, LaPorte R, Sandler R, Schramm M, Kriska A. Comparison of methods to measure physical activity in postmenopausal women. The American Journal of Clinical Nutrition. 1987;45(1):14-22. https://doi.org/10.1093/ajcn/45.1.14

64. Babyak MA. What you see may not be what you get: a brief, nontechnical introduction to overfitting in regression-type models. Psychosom Med. 2004; 66: 411-2 https://doi.org/10.1097/01.psy.0000127692.23278.a9

65. Peduzzi PN, Concato J, Kemper E, Holford TR, Feinstein AR. A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. J Clin Epidemiol 1996;49:1373–9 https://doi.org/10.1016/s0895-4356(96)00236-3

66. Balota DA, Dolan PO, Duchek JM. Memory changes in healthy older adults. In Endel Tulving, ed. The Oxford handbook of memory (p. 295-409). Oxford University Press:2000. p.395-410

67. Angel L, Isingrini M, Bouazzaoui B, Taconnat L, Allan K, Granjon L, Fay S. The amount of retrieval support modulates age effects on episodic memory : Evidence from event-related potentials. Brain Research. 2010;1335:41-52. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.040

68. Boujut A, Clarys D. The effect of ageing on recollection: the role of the binding updating process. Memory. 2015;24(9):1231-1242. https://doi.org/10.1080/09658211.2015.1091893

69. Haverkamp BF, Wiersma R, Vertessen K, van Ewijk H, Oosterlaan J, Hartman E. Effects of physical activity interventions on cognitive outcomes and academic performance in adolescents and young adults : A meta-analysis. Journal of Sports Sciences. 2020;38(23):2637-2660. https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1794763

70. Kamijo K, Takeda Y. Regular physical activity improves executive function during task switching in young adults. International Journal of Psychophysiology. 2010;75(3):304-311. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.01.002

71. Ratey JJ, Loehr JE. The positive impact of physical activity on cognition during adulthood : A review of underlying mechanisms, evidence and recommendations. Reviews in the Neurosciences. 2011;22(2):171-185. https://doi.org/10.1515/rns.2011.017

72. Hillman CH, Motl RW, Pontifex MB, Posthuma D, Stubbe JH, Boomsma DI, de Geus EJC. Physical activity and cognitive function in a cross-section of younger and older community-dwelling individuals. Health Psychology. 2006;25(6):678-687. https://doi.org/10.1037/0278-6133.25.6.678

73. Cox EP, O'Dwyer N, Cook R, Vetter M, Cheng HL, Rooney K, O'Connor H. Relationship between physical activity and cognitive function in apparently healthy young to middle-aged adults : A systematic review. Journal of Science and Medicine in Sport. 2016;19(8):616-628. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2015.09.003

74. Loprinzi PD. An integrated model of acute exercise on memory function. Medical Hypotheses. 2019;126:51-59. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.03.010

75. Hall P, Fong G. Temporal self-regulation theory: a neurobiologically informed model for physical activity behavior. Frontiers in Human Neuroscience. 2015;9. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00117

76. Daly M, McMinn D, Allan J. A bidirectional relationship between physical activity and executive function in older adults. Frontiers in Human Neuroscience. 2015;8. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.01044

77. Quigley A, MacKay-Lyons M, Eskes G. Effects of Exercise on Cognitive Performance in Older Adults : A Narrative Review of the Evidence, Possible Biological Mechanisms, and Recommendations for Exercise Prescription. Journal of Aging Research. 2020;2020:1-15. https://doi.org/10.1155/2020/1407896

78. Margolis R. Educational Differences in Healthy Behavior Changes and Adherence Among Middle-aged Americans. Journal of Health and Social Behavior. 2013;54(3):353-368. https://doi.org/10.1177/0022146513489312

79. Segaert K, Lucas S, Burley C, Segaert P, Milner A, Ryan M et al. Higher physical fitness levels are associated with less language decline in healthy ageing. Scientific Reports. 2018;8(1). https://doi.org/10.1101/197095

Supporting information

S1 Table. Questions and calculation formulae from Baecke questionnaire [60]

IAS (Index of Physical Activity and Sports) **IAS = [Σ (intensity x duration x proportion) + Q2] / 2**	
Q1. Do you do any sport or physical activity? - Which sport or physical activity do you do most often? - How many hours a week? (< 1; 1-2; 2-3; 3-4; > 4) - How many months a year? (< 1; 1-3; 4-6; 7-9; > 9)	Intensity: 0.76; 1.26; 1.76 Duration: 0.5; 1.5; 2.5; 3.5; 4.5 Proportion: 0.04; 0.17; 0.42; 0.67; 0.92
If you do another sport or physical exercise, - What is it? - How many hours a week? (< 1; 1-2; 2-3; 3-4; > 4) - How many months a year? (< 1; 1-3; 4-6; 7-9; > 9)	Intensity: 0.76; 1.26; 1.76 Duration: 0.5; 1.5; 2.5; 3.5; 4.5 Proportion: 0.04; 0.17; 0.42; 0.67; 0.92
Q2. In my leisure time, I do a sport or physical activity: never/seldom/sometimes/often/very often	1; 2; 3; 4; 5
IAL (Index of Leisure Activity) **IAL = (Q3 + Q4 + Q5) / 3**	
Q3. In my leisure time, I watch TV or play video games: never/seldom/sometimes/often/very often	5; 4; 3; 2; 1
Q4. In my leisure time, I walk: never/seldom/sometimes/often/very often	1; 2; 3; 4;5
Q5. For how many minutes a day do you walk or ride a bike going to and from work, school or the shops? < 5 / 5-15 / 16-30 / 31-45 / > 4	1; 2; 3; 4; 5

Étude 2

L'EFFET PROTECTEUR DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LA MÉMOIRE ÉPISODIQUE AU COURS DU VIEILLISSEMENT S'EXPLIQUE PAR LES FONCTIONS EXÉCUTIVES[10]

En continuité avec l'étude précédente, cette seconde étude investigue les bénéfices de l'activité physique sur les performances mnésiques au travers des ressources exécutives. L'avancée en âge est marquée par une diminution des performances de mémoire épisodique qui serait en partie liée à un déficit exécutif (West, 1996, 2000). Par ailleurs, l'activité physique aurait des effets bénéfiques sur les performances exécutives comme mnésiques (Albinet et al., 2010; Hayes et al., 2015). Parmi les facteurs explicatifs des bénéfices de l'activité physique sur la mémoire, de nombreux mécanismes neurochimiques et cérébraux ont été décrits dans la littérature, mais les mécanismes cognitifs sous-jacents sont moins bien identifiés. Certaines études suggèrent néanmoins que ces bénéfices seraient plus importants lors de tâches mnésiques coûteuses (Chodzko-Zajko et al., 1992; Woo & Sharps, 2003), notamment en ressources exécutives (Moutoussamy et al., 2022). Cette différence dans les bénéfices de l'activité physique selon la tâche mnésique suggère que les effets de l'activité physique sur la mémoire pourraient dépendre des capacités exécutives. En d'autres termes, chez les adultes âgés pratiquant le plus d'activité physique, une moindre diminution des performances exécutives permettrait de maintenir des performances mnésiques plus importantes malgré l'avancée en âge. Aucune étude n'avait jusqu'à présent placé les fonctions exécutives comme facteur expliquant les effets bénéfiques de l'activité physique sur la mémoire. L'objectif principal de cette étude était donc de démontrer un potentiel effet médiateur de l'activité physique sur les effets d'âge et des fonctions exécutives sur les performances de mémoire, particulièrement chez les adultes âgés.

Pour cela, 19 adultes jeunes (M = 27.16 ans ± 5.29) et 25 adultes âgés (M = 69.64 ans ± 9 .37) ont réalisé une tâche de mémoire épisodique coûteuse en ressources exécutives. Plus précisément, avant l'encodage de chaque mot, les participants devaient mémoriser une série de

[10] Cette partie a fait l'objet d'une soumission dans la revue *European Review of Aging and Physical Activity*.

Moutoussamy I., Taconnat L., Angel L., Pothier K., Toussaint L., Fay S. (en révision) Protective effects of physical activity on episodic memory during aging are explained by executive functioning. *European Review of Aging and Physical Activity*

chiffres et de lettres (i.e., charge en mémoire de travail) et la restituer après l'encodage du mot. Cette charge en mémoire de travail devait réduire la quantité de ressources exécutives disponibles pour l'encodage en mémoire. Un indice exécutif a été calculé à l'aide de trois tâches exécutives (*Stroop, Trail Making Test* et 2-*Back*). L'activité physique pratiquée durant l'année passée a été évaluée de façon auto-rapportée grâce au questionnaire de Baecke (Baecke et al., 1982).

Les analyses *GLM* mettent en évidence des effets de l'âge, en faveur des adultes jeunes, sur les performances de mémoire ($p < .001$) ainsi que sur l'indice exécutif ($p < .001$). Les analyses montrent également un effet bénéfique de l'activité physique sur les performances mnésiques ($p < .001$) et sur l'indice exécutif ($p < .001$), indiquant alors qu'une pratique élevée d'activité physique est associée à de meilleures performances mnésiques et exécutives. Cet effet bénéfique de l'activité physique sur les performances mnésiques comme exécutives est, par ailleurs, plus important chez les adultes âgés que chez les adultes jeunes (interaction à $p < .001$ pour les performances mnésiques et $p = .039$ pour les performances exécutives). Par la suite, un modèle de médiation (prédicteurs : âge, activité physique, indice exécutif) a alors été testé avec une méthode de *bootstrapping* afin d'évaluer la significativité des chemins indirects. Les trois prédicteurs expliquent séparément les performances de mémoire des adultes âgés. Le lien entre âge et performances de mémoire est expliqué par les fonctions exécutives d'une part (38% de la variance des performances) et par l'activité physique d'autre part (78% de la variance des performances). Par ailleurs, lorsque les trois prédicteurs sont entrés ensemble dans l'analyse, seule l'activité physique prédit significativement les performances en mémoire (modèle expliquant 79% de la variance des performances). Les effets des autres prédicteurs sont, eux, annulés. De plus, le chemin indirect indiquant que les effets de l'âge sur les performances de mémoire s'expliquent par les fonctions exécutives, elles-mêmes expliquées par l'activité physique, apparaît comme significatif (95% *CI* [-0.68, -0.06]).

L'activité physique serait alors un facteur de réserve cognitive permettant de protéger de la diminution des performances mnésiques et exécutives liée à l'âge. Ainsi, il semblerait que malgré la charge en mémoire de travail limitant les ressources exécutives disponibles pour l'encodage, les adultes âgés pratiquant le plus d'activité physique seraient capable de conserver des performances mnésiques plus élevées que ceux pratiquant moins d'activité physique. Plus spécifiquement, lors d'une tâche mnésique coûteuse, les adultes âgés pratiquant le plus d'activité physique auraient de meilleures performances exécutives, soutenant de meilleures performances mnésiques

European Review of
Aging and Physical Activity

RESEARCH ARTICLE Open Access

Protective effects of physical activity on episodic memory during aging are explained by executive functioning

Ilona Moutoussamy, Laurence Taconnat, Lucie Angel, Kristell Pothier, Lucette Toussaint & Séverine Fay

Abstract

Aging is marked by a memory decline related to an executive function decline. Physical activity (PA) has beneficial effects on both executive functions and memory, especially in aging. The protective effects of PA on these two cognitive abilities have always been studied separately, despite the well-established relationship between memory and executive functions. Our objective was to explore whether the benefits of PA on memory could be explained by reduced age-related changes in executive functions.

Nineteen young adults (27.16 years old) and 25 older adults (69.64 years old) performed a resource-dependent memory task, three executive tasks and completed a PA questionnaire (measuring sports and leisure PA). Age group and PA effects on memory and executive performance were analyzed with generalized linear models. Mediation analyses were calculated using method of causal steps approach with a non-parametric bootstrapping procedure.

The results confirmed the effects of age and PA on memory and executive performance. A significant interaction confirmed the protective effect of PA on age-related cognitive performance. PA was positively correlated with performance in both memory and executive tasks, but only in the older adults. Although each predictor alone (age, executive functions and PA) significantly explained memory performance in older adults, only the effect of PA remained significant when all the predictors were introduced in the analyses.

PA mediates the effects of age and executive functions on memory performance. This suggests that PA protects older adults against memory decline by reducing the decline in executive functioning.

1. INTRODUCTION

Understanding the accompanying changes and the protective factors against cognitive aging has become a major health issue. Impaired episodic memory (involving retrieval of personal experiences and their spatial and temporal contexts) is one of the main concerns of older adults, and is well documented in the literature (see [1] for a meta-analysis). Episodic memory loss is greater in tasks that do not provide environmental support (e.g., free recall, [2-4]) and require participants to self-initiate efficient memory strategies. These tasks require more executive resources than those that provide environmental support (e.g., recognition).

Executive functions are defined as "a set of general-purpose control mechanisms, often linked to the prefrontal cortex of the brain, that regulate the dynamics of human cognition and action" [5]. These specific functions are involved in self-initiated memory strategies during encoding and retrieval (e.g., [6]). Several studies and meta-analyses have confirmed that executive functioning is impaired in aging, with a deficit in each specific function presented in Miyake et al.'s [7] model (i.e., inhibition, flexibility and updating; see [8] for a review). According to the executive hypothesis of aging [9], the age-related deficit in executive functions could explain episodic memory decline, especially in the most resource-demanding tasks, due to difficulty in self-initiating effective memory strategies [6,10,11].

Many individual differences in episodic memory performance can be observed among older adults, both qualitatively (e.g., vivacity and precision of recall) and quantitatively (e.g., number of correct recalls). These differences can be explained by cognitive reserve, defined as mechanisms that protect against cognitive decline [12]. Cognitive reserve allows older adults to compensate for decline through a more efficient use of cognitive processes. Thus, healthy older adults with high cognitive reserve show less episodic memory decline. Factors such as educational level, social and physical activities have been studied for their protective effects on episodic memory in advancing age [13].

Voelcker-Rehage et al. [14] showed that physical activity (PA) (grip force and spiroergometry, i.e., cardiovascular fitness) was positively related to performance on a modified version of the Flanker Task and N-Back task in older adults (see [15] for a meta-analysis). PA (measured with actimetry) has also been found to be positively associated with episodic memory performance, but only in older adults (e.g., [16], see [17] for a meta-analysis). These results have been replicated with self-report measures, such as PA questionnaires (see [18, 19]). In most studies, PA is seen as a protective factor during aging, as its benefits are observed more in older than in

younger adults. Moreover, these benefits seem to depend on the complexity of the task, as they appear to be greatest on the most demanding episodic memory tasks [20, 21].

Various explanatory factors of the benefits of PA on cognition have been put forward, including neurobiological factors (e.g., functional and structural brain changes or cellular and molecular changes; see [22,23] for reviews) and cardiovascular factors (e.g., [24]). However, the benefits of PA on cognition are variable. The neurobiological and cardiovascular factors alone cannot explain for these differences which may be due to additional cognitive mechanisms. Some researchers have suggested that these benefits could be explained by a lower decline of executive functioning (e.g., [19], but see [25] for a model of acute PA on memory function). According to this view, physically active older adults would experience a lower decline of executive functions, thereby maintaining effective memory. However, no study has directly tested this hypothesis.

Many studies have shown the protective effect of PA on episodic memory and executive functions, as well as the association between episodic memory and executive functions. No studies have examined the relationships between all these variables. While some authors have suggested that executive functions might mediate the effect of PA on episodic memory, this has never been tested. Thus, the aim of the current study was to determine whether the benefits of PA during aging in a resource-dependent episodic memory task could be explained by a lower decline of executive functioning. We aimed to confirm that (1) memory and executive performance would be better in younger than older adults, and (2) PA would be beneficial for both memory and executive performance, particularly in older adults. Finally, if these prerequisites are met, we expected that PA would be the strongest predictor of memory performance in older adults, and that this factor would mediate the age and executive effects on memory performance. Based on these empirical results, a model of the benefits of PA on memory explained by executive function in older adults could be proposed.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. PARTICIPANTS

Nineteen young adults (aged 21 to 39 years) and 25 older adults (aged 61 to 88 years) participated voluntarily in this study. All the participants were French-speaking, had no anxiety or depressive disorders (score <11 on each subscale of the HADS [26]), no neurological or psychiatric history, and were not taking medication that could affect cognition. The older adults were screened on the Mini Mental State Examination (MMSE [27]); they all scored over the 27-point cut-off. Participants' characteristics are presented in **Table 1**. Younger adults had a higher educational

level than older adults [$t(42) = 4.49$; $p < .001$]. No significant differences between our groups were found in terms of vocabulary [$t(42) = 1.17$; $p = .249$] (measured with the Mill-Hill [28]), anxiety [$t(42) = -1.04$; $p = .305$], depression [$t(42) = -1.14$; $p = .259$] (both measured with the HADS) or gender [*Pearson* $Chi^2 = 1.83$; $p = .176$]. This study was approved by the ethics committee of the University of Tours (France).

Table 1. Means (and SD) of participants' characteristics in each age group

	Younger adults (*n* = 19)	**Older adults (*n* = 25)**
Age (years)	27.16 (5.29)	69.64 (9.37)
Educational level (years)	13.32 (2.14)	10.44 (2.08)
Vocabulary (maximum score 34)	23.84 (2.48)	22.28 (5.40)
Anxiety (maximum score 21)	3.63 (2.19)	4.44 (2.80)
Depression (maximum score 21)	3.95 (2.59)	4.92 (2.94)
Sex ratio (% of women)	31.58	52.00

2.2. MATERIAL AND PROCEDURE

The procedure was carried out in the following order: consent form, MMSE for older adults, Stroop task, familiarization (3 trials) and episodic memory task, Trail Making Test, 2-Back test, and finally HADS, Mill-Hill and PA questionnaire.

2.2.1. EPISODIC MEMORY TASK

Following Moutoussamy et al. [1]), we used a resource-dependent paradigm, in which a high-load working-memory task was introduced during the encoding phase of a word-stem cued recall task (episodic memory task, **Figure 1**). Before the encoding of each target word, participants had to memorize in working memory a series of 5 random characters, alternating letters (from B to L, without vowels) and numbers (from 1 to 9), always starting with a number. No letter or number appeared twice to avoid chunking. This load must be recalled after the presentation of the word to ensure that it has been maintained in working memory during the word encoding. The episodic memory task involved three lists of ten words (counterbalanced), two for the encoding phase, and an additional one for the retrieval phase. Thus, the participant completed 30 trigrams during the retrieval phase. The words in each list were similar in terms of length, frequency of use in French, and concreteness.

The procedure was as follows. In the encoding phase, a fixation cross was presented for 1000 ms, followed by a series of letters and numbers (load, e.g., 5B6J9) for 3000 ms, a blank screen for 200 ms, the word to memorize for 2500 ms, and a question mark for 3000 ms. When the

question mark appeared, participants had to recall the series of letters and numbers. To ensure that none of the participants had neglected the working-memory task (i.e., recall of the series of letters and numbers), only those with more than 70% correct responses were retained for statistical analysis. In the retrieval phase, a fixation cross appeared for 1000 ms followed by a word-stem for 500 ms and a question mark for 4500 ms. When the question mark appeared, participants had to recall a previously learnt word starting with the stem, or produce a new word beginning with the same letters and they had to say whether the produced word was an old or a new one. Theoretically, the whole task required a high level of executive control, as the working-memory task plus the episodic-memory task place a high demand on cognitive resources [29, 30].

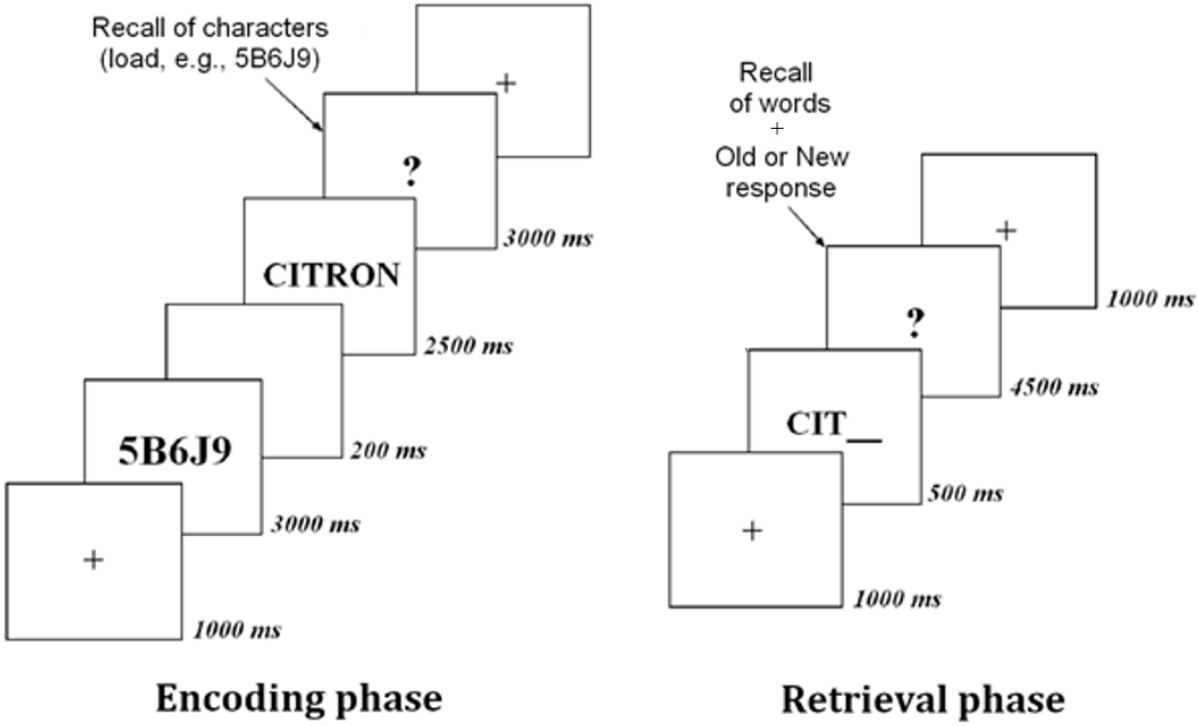


Figure 1. Procedure of the episodic memory task for both encoding and retrieval phases

Two dependent variables were used: the percentage of incorrectly recalled letters/numbers (i.e., working-memory task) and the percentage of correctly recalled words (i.e., episodic memory performance). The episodic memory performance represents a conscious retrieval of the memory in its learning context since it represents the percentage of trigrams of old words completed by an old word and judged as old by the participant. For example, "CITRON-Old" is a conscious retrieval but "CITRON-New" is an unconscious retrieval and did not account in the percentage of correctly recalled words.

2.2.2. EXECUTIVE FUNCTIONS: UPDATING, INHIBITION AND FLEXIBILITY

Updating was assessed with a 2-Back task [31]. Thirty letters were presented aloud by the experimenter at a frequency of one letter per second. For each letter, the participant had to indicate whether it was the same as the one given two letters before, answering "yes" or "no". A practice session was carried out first, to ensure that the instructions were understood. The number of correct answers was counted (maximum 28).

Inhibition was evaluated using a paper-and-pencil Stroop task [32]. Three cards were presented for 45 seconds each. On card A, color names were written in black ink and the participant had to read a maximum number of words. Card B showed crosses printed in red, green or blue ink, and the participant had to name a maximum number of colors. On card C, color names were written in a different ink color, and the participant had to name as many ink colors as possible, inhibiting reading the word (e.g., when the word blue is printed in red, the correct answer is red). The number of items correctly completed in 45s for each card was counted. The inhibition index was calculated by subtracting the result of card C from that of card B and dividing the result by the score of card B [33]. This gives a value between 0 and 1: the lower the index, the better the performance.

Flexibility was measured with a paper-and-pencil Trail Making Test [34]. Participants are shown two cards. Card A has numbers from 1 to 25, and the participant has to draw a line connecting them in ascending order as quickly as possible. Card B has numbers (from 1 to 13) and letters (from A to L), and participants have to link the numbers and letters alternately in ascending order (1, A, 2, B, etc.) as quickly as possible. The flexibility index was calculated by subtracting the time taken to complete card A from the time to complete card B [35]. The lower the index, the better the performance.

Finally, a composite index comprising the three measures was calculated for each participant to obtain an index of overall executive functioning. The load factor of each executive function was calculated using factor analysis (-0.75 for inhibition, -0.90 for flexibility, 0.91 for updating), confirming their involvement in a common factor, the executive index (0.74 for total load factor). Each executive function performance was transformed into a Z-score before the following ponderation formula was applied. A higher index indicates a higher level of executive functioning.

$$executive\ index\ = \sum_{i=1}^{3} [Z\ score\ of\ executive\ performance\ x\ load\ factor\ for\ each\ measure] \Big/ total\ load\ factor$$

2.3. HABITUAL PA QUESTIONNAIRE

Baecke's questionnaire [36] was used to assess physical and sports activities (e.g., yoga, swimming, dance) and daily activities (e.g., walking, moving about). This questionnaire measures three domains of daily PA over the last 12 months: PA at work (IAT, 8 questions), PA during leisure time (IAL, 3 questions) and sports (IAS, 2 questions). Like Bigard et al. (37) and Moutoussamy et al. [19], we only assessed IAL and IAS, since the majority of older adults are no longer working. The questionnaire and the calculation formula are described in detail in Moutoussamy et al. [19]. The overall PA index is the sum of IAL and IAS: the higher the index, the greater the level of daily PA.

2.4. STATISTICAL ANALYSES

All the statistical analyses were conducted using R 4.2.1 software. Age group and PA effects were analyzed with generalized linear models (GLM) for each dependent variable (i.e., % correctly recalled words, % errors on the working-memory task, and executive index). Effect sizes for significant effects and interactions were calculated using partial eta squared ($\eta_p 2$). As PA was analyzed as a continuous variable in the GLMs, correlation analyses were conducted between PA and cognitive measures to understand the significant effects and interactions. Finally, based on the relationships observed between our variables in each age group, mediation analyses were calculated using method of causal steps approach (i.e., hierarchical linear regression analysis). A non-parametric bootstrapping procedure was used as some predictors do not follow a normal distribution in older adults. Coefficients (b) and confidence intervals (CI) were estimated with 5000 bootstrap resamples. As recommended by Wood et al. [38], we tested the significance of indirect effects using Preacher and Hayes' [39] bootstrapping process for R version 4.1.1. Thus, when zero is included in the confidence interval, the effect cannot be considered as significant. By contrast, when zero is not included, the effect can be considered as significant.

3. RESULTS

Results for the episodic memory task, executive functions and PA are presented in **Table 2**. No effect of age group on IAL and IAS [$t(42) = 1.47$; $p = .149$ and $t(42) = -0.28$; $p = 0.781$ respectively] or on the overall PA index [$t(42) = 0.03$; $p = .975$].

3.1. EPISODIC MEMORY

The GLM conducted on episodic memory performance confirmed the age-group effect, $F(1,40) = 90.85$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.69$, with fewer words correctly recalled by older than younger adults.

The results also showed an effect of PA, F (1,40) = 17.07, p < .001, η^2_p = 0.30. Correlational analyses indicated that PA was positively related to episodic memory performance (r = 0.32, p = .034). Finally, the interaction between age group and PA was significant, F (1,40) = 15.28, p < .001, η^2_p = 0.28. The positive correlation between PA and memory performance was significant in older adults (r = 0.89, p < .001) but not in younger adults (r = -0.10, p = .695).

The GLM performed on the working-memory task revealed an effect of age group, F (1,40) = 35.43, p < .001, η^2_p = 0.47, with a higher percentage of errors by older than younger adults. This analysis also showed an effect of PA, F (1,40) = 10.14, p = .003, η^2_p = 0.20; participants with higher levels of PA made fewer errors on the working-memory task (r = -0.34, p = .024). This effect was similar in younger and older adults (respectively, r = -0.28, p = .244 and r = -0.57, p = .003), as there was no significant interaction between age and PA, F (1, 40) = 0.56, p = .458.

Table 2. Means (and SD) of memory scores, executive index and PA measures for each age group

	Younger adults (*n* = 19)	**Older adults (*n* = 25)**
Episodic memory score		
% of correctly recalled words	48.16 (10.57)	25.00 (10.41)
Working-memory score		
% of errors on the working-memory task	10.53 (6.64)	21.00 (6.12)
Executive functions score		
Inhibition	0.32 (0.11)	0.448 (0.09)
Flexibility	26.05 (7.10)	59.04 (32.96)
Updating	24.68 (1.83)	21.40 (3.37)
Executive index	2.23 (1.37)	-1.53 (2.68)
Physical activities		
Leisure activities (IAL)	2.74 (0.65)	3.08 (0.84)
Sports (IAS)	4.27 (3.54)	3.97 (3.64)
PA index	7.01 (3.52)	7.05 (3.91)

3.2. EXECUTIVE INDEX

The GLM performed on the executive index revealed an age-group effect, F (1,40) = 44.52, p < .001, η^2_p = 0.53, with better executive functioning in younger adults. The analysis also showed an effect of PA, F (1,40) = 15.88, p < .001, η^2_p = 0.28, with higher levels of PA corresponding to a higher executive index (r = 0.39, p = .010). Finally, a significant interaction was found between PA and executive index, F (1, 40) = 4.57, p = .039, η^2_p = 0.10, indicating that this relationship was significant only in older adults (r = 0.63, p = .001) and not in younger adults (r = 0.24, p = .315).

3.3. REGRESSION ANALYSIS

Episodic memory performance and executive index were positively correlated (r = .60, p = .002) in older adults. Significant negative correlations were found between these two variables and the chronological age of older adults (r = -.50, p = .01 for episodic memory, r = -.67, p < .001 for executive index) and between PA and the chronological age of older adults (r = -.56, p = .004 for PA). As these linear relationships were only found in older adults, regression analyses were performed only in this age group to better understand the underlying mechanisms of PA benefits on memory and executive functions in old age. The mediation model (including age, executive index and PA as predictors of memory performance) and the different pathways are presented in **Figure 2**.

First, the regression analysis revealed a significant direct association between age and episodic memory performance (i.e., percentage of correctly recalled words), F (1,23) = 7.84, p = .010, explaining 25.4% of the variance. Age was negatively associated with memory performance (path C, b = -0.56; 95% *CI* [-0.88, -0.19]).

Age was negatively associated with executive index (path A, b = -0.19; 95% *CI* [-0.29, -0.010]), and executive index was positively associated with memory performance (path B, b = 2.33; 95% *CI* [0.81, 3.34]). The simple mediation model predicting memory performance from age and executive index (paths A, B and C) was significant, F (2,22) = 6.70, p = .005, explaining 38% of the variance in memory performance. This model showed that after controlling for executive functioning (b = 1.85; 95% *CI* [0.15, 3.12]), the negative association between age and memory performance was no longer significant (b = -0.20; 95% *CI* [-0.64, 0.20]). Importantly, the indirect effect explaining the effect of age on memory performance through executive index was significant, 95% *CI* [-0.76, -0.11].

Age was negatively associated with PA (path D, b = -0.23; 95% *CI* [-0.34, -0.11]) and PA was positively associated with memory performance (path E, b = 2.36; 95% *CI* [1.81, 2.76]). The other simple mediation model predicting memory performance from age and PA (paths D, E and C) was also significant, F (2,22) = 40.37, p < .001, explaining 78% of the variance in memory performance. As in the previous model, after controlling for PA (b = 2.33; 95% *CI* [1.77, 2.85]), the negative association between age and memory performance was no longer significant (b = -0.02; 95% *CI* [-0.26, 0.24]). For this model, the indirect effect explaining the age effect on memory performance through PA was significant, 95% *CI* [-0.81, -0.31].

The executive index was positively associated with PA (path F, *b* = 0.91; 95% *CI* [0.52, 1.32]). The overall mediation model predicting memory performance from age, executive index and PA was significant, F (3,21) = 26.23, $p < .001$, explaining 79% of the variance in memory performance. Most importantly, the effects of age and executive index on memory performance were no longer significant (respectively, *b* = 0.03; 95% *CI* [-0.28, 0.34] and *b* = 0.34; 95% *CI* [-0.92, 1.35]) when PA (*b* = 2.25; 95% *CI* [1.68, 2.80]) was entered in the regression analysis. These important results show that the effects of both age and executive index on episodic memory are mediated by PA. In this mediation model, the indirect effects explaining the effect of age on memory performance through executive index (paths A and B) and through PA (paths D and E) were no longer significant, 95% *CI* [-0.28, 0.17] and 95% *CI* [-0.46, 0.07] respectively. The serial indirect pathway explaining the effect of age on memory performance through executive index and then PA (corresponding to paths A, F and E) was significant, 95% *CI* [-0.68, -0.06], suggesting that the effect of age on memory could be predicted by executive index, which itself could be predicted by PA.

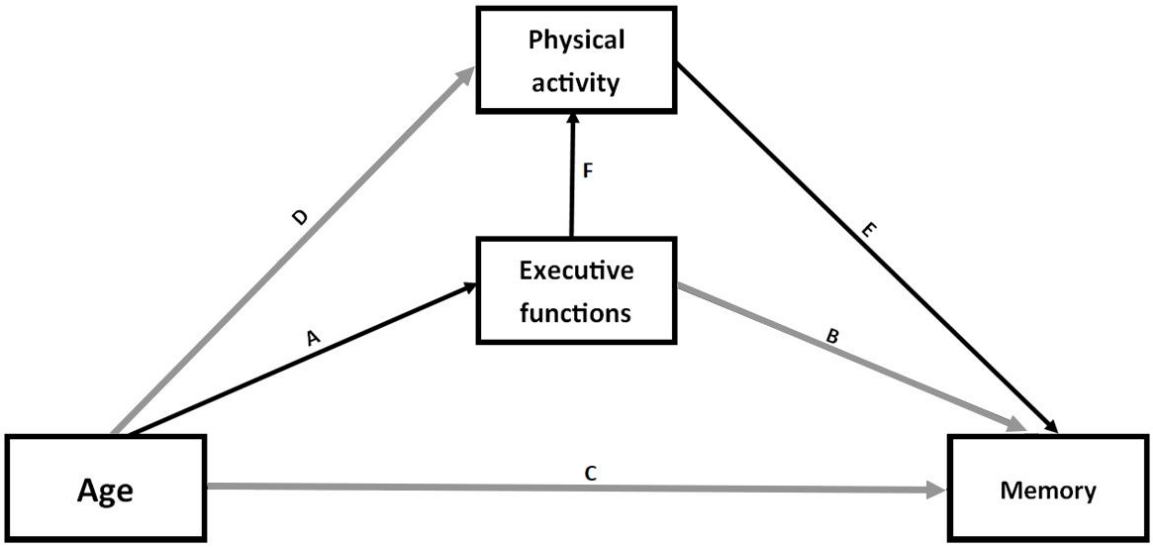


Figure 2: Mediation model and paths in older adults explaining episodic memory performance with age, PA and executive index as predictors. Main findings: ABC indicates that the effect of age on memory could be predicted by executive functions. DEC indicates that the effect of age on memory could be predicted by PA. The significant indirect pathway (in black) indicates the effect of age on memory could be predicted by executive functions, which itself could be predicted by PA.

As PA was also positively associated with executive index (reverse path F, *b* = 0.43; 95% *CI* [0.23, 0.64]), we tested the serial indirect pathway explaining the effect of age on memory performance through PA and then executive index (corresponding to paths D, reverse F and B). This indirect pathway was non-significant, 95% *CI* [-0.10, 0.05].

4. DISCUSSION

Our main objective was to demonstrate that PA mediates both the effects of age and executive functions on the memory performance of older adults. Our results suggested that the benefits of PA on episodic memory can be explained by a lower executive decline. This is the first study to explore the effect of PA on an episodic memory task that includes a high-load working-memory task during the encoding phase. During encoding, the amount of executive resources available to encode the target words are reduce by a working-memory load. Theoretically, only participants with high executive resources could correctly encode the words presented. In addition, during the retrieval, participants specified an old/new judgment in order to identify episodic responses, for which the effects of PA seemed to emerge significantly.

Our results confirmed the effects of age on memory [1] and on the working-memory load [40]: younger adults correctly recalled more words and made fewer errors in the working-memory task than older adults. Interestingly, the results confirmed that PA could be beneficial for memory performance (e.g., [16,18,19,20,21]), and showed that these benefits are not affected by a simultaneous resource-demanding task (i.e., working-memory task), which has not been demonstrated in previous studies. Moreover, the benefits of PA on episodic memory performance were only significant in older adults. Thus, engagement in PA maintains the episodic memory performance of older adults, in accordance with previous research (e.g., [16,17]). The current study also confirmed the well-established effect of age (see [8] for a review) and the benefits of PA on executive functions, particularly for older adults [15]. Indeed, the age effects were lower in the most physically active older adults. In other words, physically active older adults had better executive performance than their less physically active peers. That confirms the protective effect of PA on episodic memory and executive functions in older adults and that PA is a cognitive reserve factor for older adults [15,17–19].

Our main objective was to determine whether the benefits of PA on episodic memory in older adults could be explained by executive functioning in a cross-sectional study design. We expected that PA would be the strongest predictor of memory performance and that this factor would mediate the effect of age and executive functions on memory performance. The results did reveal that each predictor (age, executive functions and PA) explained the memory performance of older adults. Moreover, executive functions mediated age-related effects in memory performance. Thus, memory performance during aging could be explained by executive performance, as older adults with a higher executive index had the best memory performance, and conversely. This is in line with the results of other studies [6,10,11,41–43] and is consistent

with the executive hypothesis of aging [9]. More importantly, our results revealed that PA was the main predictor of memory performance and that it mediated the effects of both age and executive functioning on memory performance.

While many studies have demonstrated the benefits of PA on cerebral reserve, explaining cerebral plasticity through structural, functional or neurochemical factors (e.g., [23,24,44]), only a few studies have investigated the complementary cognitive mechanisms underlying the benefits of PA. The current study indicates that PA mediates the effects of age and executive functioning on memory performance because older adults who are more physically active could have higher executive functions, and consequently, better episodic memory. This suggests that the benefits of PA could be associated with a reorganization or preservation of cognitive processes.

In order to further explore the relation between PA, memory and executive functions, it would be interesting to investigate more precisely indicators of accuracy in episodic memory performance. For example, it would be interesting to consider recognition accuracy using Remember/Know judgment or indicators of accuracy and strategies from the signal detection theory [45]. In fact, we assume that Remember responses would be higher in older adults who engage in the most PA, as these responses involve more conscious recollection and executive processes than Know responses. Moreover, according to the signal detection theory, older adults use a rather liberal strategy (more "old" responses), increasing the number of false alarms in this age group. We can therefore assume that for older adults who engage in the most PA, the liberal strategy would be less important and therefore memory performance would be more accurate because of fewer false alarms. Taking these strategies into account would provide new insights into the PA-memory relationship during aging.

This study focused on general executive functioning and was based on an index calculated from three measures capturing a fraction of each of the executive functions: one for inhibition, one for flexibility, and one for updating. It might be interesting to examine the effects of each of the executive functions, assessed each by different measures, in the relationship between age, memory and PA. It would also be relevant to consider that the nature of the PA (e.g., open vs. closed-skill) might influence executive functions differently depending on the demands required by the PA. Moreover, executive functions play an important role in efficient mnemonic strategies [6] and memory performance [10,11,47]. Hence, if PA has a beneficial effect on executive performance, we can assume that this would in turn influence mnemonic strategies. Future studies should investigate changes in the use and efficacy of mnemonic strategies by physically

active older adults during encoding and retrieval. Finally, concerning PA, we believe that the use of questionnaires, validated with objective data, enables PA to be assessed over longer periods (e.g., one year in the present study) than objective measures such as actimetry. It would thus be particularly interesting to develop the use of such questionnaires in large (e.g., epidemiological) studies.

To conclude, while this study suggested that executive functioning is one of the many factors contributing to the benefits of PA on episodic memory, other explanations could be put forward and should be considered. These include the two-way link between PA and cognition, many studies demonstrating that people with higher executive performance are more apt to persevere in healthy behavior, such as PA [48,49]. This would in turn improve executive functions. A two-directional model between episodic memory and PA has recently been proposed, highlighting the need for further investigation [50]. One of the main limitations concerns the cross-sectional design of our study. To conduct more robust mediation analyses that establish causal relationships, it is important to have interventional data [51]. The mediation model, which is suggested by cross-sectional data, could be confirmed and developed by interventional studies. If done, it would also be interesting to explore in greater depth the effects of different types of PA (e.g., aerobic, resistance), intensity and duration. While cerebral and cognitive factors are those that have been most extensively studied, PA also leads to psychological changes (e.g., in stress, sleep quality, depression, and social interactions); further research is required to examine the effects of these changes on the benefits observed. Although there is a wealth of literature showing the benefits of PA on cognition, a better understanding of the underlying mechanisms is needed. Accordingly, as PA is one of several cognitive reserve factors, it would be interesting to replicate our results while controlling for others factor, as in Kachouri et al. [18], or examining a possible moderation effect of these other cognitive reserve factors on the effects of PA on memory. In this way, it would be possible to maximize the benefits of PA on cognitive performance by showing "how" these benefits exist and "who" benefits the most.

References

1. Rhodes S, Greene NR, Naveh-Benjamin M. Age-related differences in recall and recognition: a meta-analysis. Psychon Bull Rev. 2019;26(5):1529-47.
2. Burger L, Uittenhove K, Lemaire P, Taconnat L. Strategy difficulty effects in young and older adults' episodic memory are modulated by inter-stimulus intervals and executive control processes. Acta Psychol. 2017;175:50-9.

3. Craik FIM. Reducing age-related Memory Deficits: The Roles of Environmental Support and self-initiated Processing Activities. Exp Aging Res. 2022;48(5):401-27.

4. Angel L, Isingrini M, Bouazzaoui B, Taconnat L, Allan K, Granjon L, et al. The amount of retrieval support modulates age effects on episodic memory: Evidence from event-related potentials. Brain Res. 2010;1335:41-52.

5. Miyake A, Friedman NP. The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. Curr Dir Psychol Sci. 2012;21(1):8-14.

6. Taconnat L, Clarys D, Vanneste S, Bouazzaoui B, Isingrini M. Aging and strategic retrieval in a cued-recall test: The role of executive functions and fluid intelligence. Brain Cogn. 2007;64(1):1-6.

7. Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks: A Latent Variable Analysis. Cognit Psychol. 2000;41(1):49-100.

8. Reuter-Lorenz PA, Festini SB, Jantz TK. Executive Functions and Neurocognitive Aging. In: Handbook of the Psychology of Aging (Eighth Edition). Elsevier; 2016. p. 245-62.

9. West R. In defense of the frontal lobe hypothesis of cognitive aging. J Int Neuropsychol Soc. 2000;6(6):727-30.

10. Bouazzaoui B, Angel L, Fay S, Taconnat L, Charlotte F, Isingrini M. Does the greater involvement of executive control in memory with age act as a compensatory mechanism? Can J Exp Psychol Can Psychol Expérimentale. 2014;68(1):59-66.

11. Clarys D, Bugaiska A, Tapia G, Alexia Baudouin. Ageing, remembering, and executive function. Memory. 2009;17(2):158-68.

12. Stern Y. What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. J Int Neuropsychol Soc. 2002;8(3):448-60.

13. Whalley LJ, Deary IJ, Appleton CL, Starr JM. Cognitive reserve and the neurobiology of cognitive aging. Ageing Res Rev. 2004;3(4):369-82.

14. Voelcker-Rehage C, Godde B, Staudinger UM. Physical and motor fitness are both related to cognition in old age. Eur J Neurosci. 2010;31(1):167-76.

15. Xiong J, Ye M, Wang L, Zheng G. Effects of physical exercise on executive function in cognitively healthy older adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Int J Nurs Stud. 2021;114:103810.

16. Hayes SM, Alosco ML, Hayes JP, Cadden M, Peterson KM, Allsup K, et al. Physical Activity Is Positively Associated with Episodic Memory in Aging. J Int Neuropsychol Soc. 2015;21(10):780-90.

17. Aghjayan SL, Bournias T, Kang C, Zhou X, Stillman CM, Donofry SD, et al. Aerobic exercise improves episodic memory in late adulthood: a systematic review and meta-analysis. Commun Med. 2022 ;2(1)

18. Kachouri H, Fay S, Angel L, Isingrini M. Influence of current physical exercise on the relationship between aging and episodic memory and fluid intelligence. Acta Psychol. 2022;227:103609.

19. Moutoussamy I, Taconnat L, Pothier K, Toussaint L, Fay S. Episodic memory and aging: Benefits of physical activity depend on the executive resources required for the task. PLOS ONE. 2022;17(2):e0263919.

20. Chodzko-Zajko WJ, Schuler P, Solomon J, Heinl B, Ellis NR. The Influence of Physical Fitness on Automatic and Effortful Memory Changes in Aging. Int J Aging Hum Dev. 1992;35(4):265-85.

21. Woo E, Sharps MJ. Cognitive aging and physical exercise. Educ Gerontol. 2003;29(4):327-37.

22. Bherer L, Erickson KI, Liu-Ambrose T. A Review of the Effects of Physical Activity and Exercise on Cognitive and Brain Functions in Older Adults. J Aging Res. 2013;657508.

23. McMorris T. Chronic exercise and cognition in humans: A review of the evidence for a neurochemical basis. In: Exercise-cognition interaction: Neuroscience perspectives. In T. McMorris (Ed.). Elsevier Academic Press; 2016. p. 167-86.

24. Albinet CT, Mandrick K, Bernard PL, Perrey S, Blain H. Improved cerebral oxygenation response and executive performance as a function of cardiorespiratory fitness in older women: a fNIRS study. Front Aging Neurosci. 2014;6(272).

25. Loprinzi PD. An integrated model of acute exercise on memory function. Med Hypotheses. 2019;126:51-9.

26. Zigmond AS, Snaith RP. The Hospital Anxiety and Depression Scale. Acta Psychiatr Scand. 1983;67(6):361-70.

27. Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. "Mini-mental state". J Psychiatr Res. 1975;12(3):189-98.

28. Deltour J. Echelle de vocabulaire du Mill Hill de J.C. Raven. Adaptation françaises et normes comparées du Mill Hill et du Progressive Matrice (PM38). Manuel et Annexes Braine le Château, Belgique : Application des Techniques Modernes. 1993.

29. Clarys D, Isingrini M, Haerty A. Effects of attentional load and ageing on word-stem and word-fragment implicit memory tasks. Eur J Cogn Psychol. 2000;12(3):395-412.

30. Mulligan NW. Attention and implicit memory tests: The effects of varying attentional load on conceptual priming. Mem Cognit. 1997;25(1):11-7.

31. Kirchner WK. Age diffrences in short-term retention of rapidly changing information. J Exp Psychol. 1958;55(4):352-8.

32. Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reaction. J Exp Psychol. 1935;18:643-62.

33. Sisco SM, Slonena E, Okun MS, Bowers D, Price CC. Parkinson's disease and the Stroop color word test: processing speed and interference algorithms. Clin Neuropsychol. 2016;30(7):1104-17.

34. Reitan RM. Validity of trail making test as an indicator of organic brain damage. Percept Mot Skills. 1958;8(3):271-6.

35. Sánchez-Cubillo I, Periáñez JA, Adrover-Roig D, Rodríguez-Sánchez JM, Ríos-Lago M, Tirapu J, et al. Construct validity of the Trail Making Test: Role of task-switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. J Int Neuropsychol Soc. 2009;15(3):438-50.

36. Baecke JA, Burema J, Frijters JE. A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. Am J Clin Nutr. 1982;36(5):936-42.

37. Bigard A, Duforez F, Portero P, Guezennec C. Détermination de l'activité physique par questionnaire: validation du questionnaire autoadministrable de Baecke. 1992;7.

38. Wood RE, Goodman JS, Beckmann N, Cook A. Mediation Testing in Management Research: A Review and Proposals. Organ Res Methods. 2008;11(2):270-95.

39. Preacher KJ, Hayes AF. Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. Behav Res Methods. 2008;40(3):879-91.

40. Klencklen G, Banta Lavenex P, Brandner C, Lavenex P. Working memory decline in normal aging: Memory load and representational demands affect performance. Learn Motiv. 2017;60:10-22.

41. Taconnat L, Raz N, Toczé C, Bouazzaoui B, Sauzéon H, Fay S, et al. Ageing and organisation strategies in free recall: The role of cognitive flexibility. Eur J Cogn Psychol. 2009;21(2-3):347-65.

42. Taconnat L, Baudouin A, Fay S, Clarys D, Vanneste S, Tournelle L, et al. Aging and implementation of encoding strategies in the generation of rhymes: The role of executive functions. Neuropsychology. 2006;20(6):658-65.

43. Bouazzaoui B, Fay S, Taconnat L, Angel L, Vanneste S, Isingrini M. Differential involvement of knowledge representation and executive control in episodic memory performance in young and older adults. Can J Exp Psychol Can Psychol Expérimentale. 2013;67(2):100-7.

44. Colcombe SJ, Erickson KI, Raz N, Webb AG, Cohen NJ, McAuley E, et al. Aerobic Fitness Reduces Brain Tissue Loss in Aging Humans. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2003;58(2):M176-80.

45. Green DA, Swets JA. Signal detection theory and psychophysics. Oxford, UK: John Wiley. 1966

46. Fraundorf SH, Hourihan KL, Peters RA, Benjamin AS. Aging and recognition memory: A meta-analysis. Psychological Bulletin. 2019;145(4):339-71.

47. Kirchhoff BA, Gordon BA, Head D. Prefrontal gray matter volume mediates age effects on memory strategies. NeuroImage. 2014;90:326-34.

48. Daly M, McMinn D, Allan JL. A bidirectional relationship between physical activity and executive function in older adults. Front Hum Neurosci. 2015;8(1044).

49. Audiffren M, André N. The exercise–cognition relationship: A virtuous circle. J Sport Health Sci. 2019;8(4):339-47.

50. Ponce P, Loprinzi PD. A bi-directional model of exercise and episodic memory function. Med Hypotheses. 2018;117:3-6.

51. Li Y, Yoshida K, Kaufman JS, Mathur MB. A brief primer on conducting regression-based causal mediation analysis. Psychol Trauma. 2023; Advance online publication.

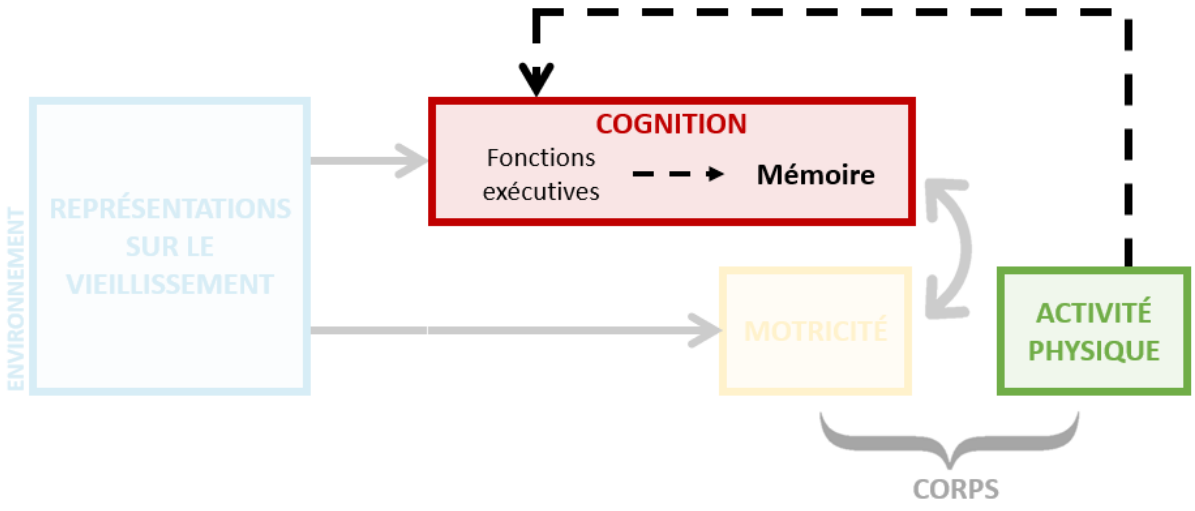
Points importants – Études 1 & 2

- **Les bénéfices de l'activité physique dépendent de la tâche mnésique**

Les effets bénéfiques de l'activité physique sont particulièrement visibles sur les tâches mnésiques nécessitant le plus de ressources exécutives, telles qu'une tâche de rappel libre (Étude 1) ou une tâche mnésique impliquant un encodage coûteux (Étude 2).

- **Les bénéfices de l'activité physique sont expliqués par les capacités exécutives**

Plus précisément, le niveau d'activité physique médiatise les effets de l'âge et des fonctions exécutives sur les performances mnésiques (Étude 2). Les adultes âgés les plus actifs physiquement auraient des capacités exécutives plus élevées et, par conséquent, une meilleure mémoire épisodique que leurs pairs moins actifs physiquement.



Étude 3

SIMULATEUR DE VIEILLISSEMENT ET PERFORMANCES MOTRICES CHEZ LES JEUNES ADULTES : LES EFFETS DÉPENDENT DE LA RAISON POUR LAQUELLE LE SIMULATEUR EST PORTÉ ![11]

Des simulateurs de vieillissement permettent de reproduire chez des adultes jeunes les changements sensorimoteurs observés au cours du vieillissement. Ces simulateurs de vieillissement sont majoritairement utilisés à des fins de formations médicales (par ex. Bowden et al., 2019, 2020; Jeong & Kwon, 2021; Schmidt et al., 2022) et d'ergonomie (par ex. adaptation des voitures, magasins Frison et al., 2018; Lavallière et al., 2017; Taşoz & Afacan, 2022). De plus en plus d'auteurs utilisent les simulateurs afin d'examiner les liens entre motricité et cognition (Schaefer et al., 2022; Vieweg et al., 2023; Vieweg & Schaefer, 2020). Malgré l'utilisation importante de ces outils dans la recherche, seules quelques études évaluent les effets des simulateurs de vieillissement sur les capacités motrices (par ex. Gaggioli et al., 2018; Vieweg & Schaefer, 2020). De manière générale, toutes concluent sur une diminution des performances motrices lorsque le simulateur est porté.

L'importance de mieux comprendre les changements moteurs induits par le simulateur est d'autant plus nécessaire que certains auteurs supposent que ces changements peuvent dépendre du nom donné au simulateur (Schaefer et al., 2022). En d'autres termes, présenter le simulateur comme un outil « vieillissant » pourrait activer des stéréotypes négatifs sur le vieillissement internalisés chez les jeunes adultes. Les études portant sur l'effet Proteus ont d'ores et déjà montré que les adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif par la réalité virtuelle adoptent les caractéristiques des adultes âgés (Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015), dépendant de leurs représentations négatives sur le vieillissement (Beaudoin et al., 2020).

[11] Cette partie a fait l'objet d'un article soumis dans la revue *Experimental Aging Research*.

Moutoussamy I., Pothier, K., Toussaint, L., Keroum, S., & Taconnat, L. Aging suit and motor performance in young adults: effects depend on why you wear the suit ! *Experimental Aging Research*

Cette troisième étude avait pour premier objectif de confirmer les effets du simulateur sur les performances motrices. Le deuxième objectif était d'étudier l'effet du simulateur en fonction du nom qui lui était donné (combinaison travaillant le maintien de la posture *vs.* simulateur de vieillissement). Mentionner l'effet « vieillissant » de la combinaison devrait activer les connaissances sur le vieillissement, ce qui pourrait se traduire par une augmentation du temps nécessaire à la réalisation des tâches motrices plus importantes lorsque le nom « simulateur de vieillissement » est utilisé comparativement au nom « combinaison travaillant le maintien de la posture ».

Pour 47 adultes jeunes, le simulateur de vieillissement a été présenté comme une « combinaison travaillant le maintien de la posture ». Pour 48 autres adultes jeunes, l'effet vieillissant de la combinaison a été mentionné. Les capacités motrices ont été évaluées à l'aide de deux tâches de motricité fine (impliquant les membres supérieurs) et de deux tâches de motricité globale (impliquant les membres inférieurs). L'activité physique a été évaluée par un questionnaire auto-rapporté (*Historical Leisure Activity Questionnaire*, Kriska et al., 1988) représentant une semaine habituelle.

Des analyses *GLM* réalisées comprenant le facteur « instruction » (simulateur de vieillissement *vs.* combinaison travaillant le maintien de la posture ; intra-sujet) et le facteur « simulateur » (avec *vs.* sans simulateur ; intra-sujet) ont été réalisées sur l'ensemble des tâches motrices. Les résultats confirment la diminution des performances motrices (i.e., augmentation du temps de réalisation des tâches) lorsque le simulateur de vieillissement est porté ($p < .001$). Cependant, l'interaction instruction x simulateur n'est significative que pour l'une des tâches de motricité globale ($p = .02$). En d'autres termes, l'augmentation du temps de réalisation de cette tâche était plus importante lorsque le simulateur avait été présenté comme un outil « vieillissant » que lorsqu'il avait été présenté comme un outil permettant de travailler la posture.

Ces résultats soulignent un lien important entre contexte environnemental et performances motrices d'adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif à l'aide de simulateur. En effet, cette étude confirme les effets attendus du simulateur de vieillissement sur la motricité mais est également la première à montrer que ces effets sont accentués lorsque le vieillissement est mentionné dans la présentation de l'outil. Néanmoins, cette accentuation des effets du simulateur sur la motricité n'est observée que pour l'un des tâches de motricité globale. Ces résultats sont discutés en fonction des tâches motrices utilisées dans l'étude, pouvant avoir un rôle dans la façon d'appréhender les effets du simulateur de vieillissement, ainsi qu'en fonction de l'approche incarnée et située.

EXPERIMENTAL AGING RESEARCH

Routledge
Taylor & Francis Group

Aging suit and motor performance in young adults: effects depend on why you wear the suit!

Ilona Moutoussamy, Kristell Pothier, Lucette Toussaint, Shaïma Kerroum & Laurence Taconnat

Abstract

Aging suits were created to reproduce age-related sensorimotor difficulties in young adults, and are increasingly being used to study the attendant cognitive changes. Understanding the motor changes induced by aging suits, and identify any factors that may modify them is therefore important. The aims of the present study were to confirm the effects of the aging suit on motor skills, and to identify possible differences in these effects depending on how the suit is presented to wearers.

95 younger adults were divided into two groups: *posture training suit* (n = 47) and *aging suit* (n = 48). Four motor tasks involving either the upper limbs or the lower limbs were performed twice (without and with the suit).

Results confirmed the effects of the suit on motor performance. The effect of the suit on motor performance was greater in the aging suit group than in the posture training suit group for one of the motor tasks.

The aging suit clearly reduced the motor performance of younger adults. Importantly, for one motor task, there was a greater reduction when *aging* was mentioned. This finding highlights the impact of presentation on motor performance when an aging suit is worn.

1. INTRODUCTION

According to the World Health Organization (2022), one person in six will be at least 60 years old in 2030. Older adults experience cognitive, affective and sensorimotor changes. At the sensorimotor level, they undergo visual changes including pathological ones (e.g., presbyopia, cataract), auditory changes (e.g., presbycusis and tinnitus), and above all physical changes (e.g.,

sarcopenia, joint stiffness, difficulty and slowness in the execution of certain movements, decrease in coordination). These sensorimotor changes can complicate daily activities. It is therefore important to understand them, in order to best support older adults in their everyday lives. Aging suits were created precisely to allow younger adults to *put themselves in the shoes* of older people. These suits have enabled them to better understand the environmental difficulties facing older adults (e.g., automated driving; Frison et al., 2018; Scherf, 2014; home living; Taşoz & Afacan, 2022; use of mobile apps; Gaggioli et al., 2018; wayfinding in a hospital; Zijlstra et al., 2016; or shopping in a store; Lavallière et al., 2017) and the empathy and care their require, particularly from medical staff (e.g., Bowden et al., 2020; Cheng et al., 2020; Eymard et al., 2010; Hsu et al., 2016; Jeong & Kwon, 2021; Lee & Teh, 2020; Ono et al., 2017; Sari et al., 2020; Schmidt et al., 2022; for a systematic review of studies published before 2010, see Tullo et al., 2010).

Aging suits generally comprise four modules, to best reproduce all the sensorimotor changes related to aging and create a whole-body experience (Groza et al., 2017): 1) head (sight, hearing, and neck motor skills), 2) torso (spinal movements), 3) arms (touch, joint movements, and fine motor skills), and (4) legs (walking and gross motor skills). Although most of these modules refer to the motor difficulties encountered by older people, few studies have investigated the effects of aging suits on motor performance (to our knowledge, only seven studies, including three focusing on walking; Gaggioli et al., 2018; Lauenroth et al., 2017; Laurentius et al., 2022; Lavallière et al., 2017; Schaefer et al., 2022; Vieweg & Schaefer, 2020; Zijlstra et al., 2016).

In Lavallière et al. (2017)'s study, younger adults performed four gross motor tasks (postural balance, shoulder and neck range of motion, lower back and hamstring flexibility, gait) with and without an aging suit (Age Gain Now Empathy System, MIT AgeLab). Results revealed poorer performances on all four motor tasks when participants wore the aging suit. This study clearly highlighted the motor difficulties induced by an aging suit. To go further, Gaggioli et al. (2018) compared a group of older adults, a group of younger adults without an aging suit, and three groups of younger adults wearing a GERonTologic simulator (GERT) aging suit (Produkt + Projekt Wolfgang Moll, Niederstotzingen, Germany): visual disturbances only, motor disturbances affecting the upper body only, and visuomotor disturbances. For the two fine motor tasks (performed over the phone), the younger adults without the suit performed the best, and the younger adults wearing the suit that induced visuomotor changes had the worst performances (i.e., closest to those of the older adults). Although this study made an interesting contribution

by comparing performances of younger adults wearing the aging suit with those of older adults, the motor tasks only involved the upper body, even though aging affects the whole body.

A recent study compared the fine and gross motor performances of younger adults wearing the GERT aging suit with the norms for older adults (Vieweg & Schaefer, 2020). Results indicated that when younger adults (M_{age} = 22 years) wore the aging suit, they lost 12-26% of their gross motor skills (measured with the Functional Fitness Test; Rikli & Jones, 1999), with performances close to those of 60-year-olds. Regarding fine motor skills (measured with a shirt-buttoning task and the Purdue Pegboard Test; Lafayette Instrument, 2015), there was a reduction of 20-30%, and the motor performance of younger adults wearing the aging suit was similar to that of adults aged 80 years and over. Declines in motor performance were also replicated in a more recent study by the same team (Schaefer et al., 2022), focusing on the choice of appropriate strategies for two different motor tasks that varied in difficulty (i.e., risk of falling). However, prior physical activity was not considered in the various studies described above (only mentioned as a limitation by Schaefer et al., 2022; Vieweg & Schaefer, 2020, as they only interviewed sports students) despite its impact on motor performance, particularly in older adults who are experiencing physical changes (Buchman et al., 2007).

Negative stereotypes about aging can affect the motor performance of older adults (Barber et al., 2020). These stereotypes are internalized in childhood, and are therefore present in younger adults (Vauclair et al., 2018). Interestingly, in some studies, younger adults have been placed in fictional aging situations using virtual reality. Results indicate that when they embody an older rather than a younger avatar, younger adults exhibit poorer motor performance (walking time; Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015) and motor imagery (mental movement; Beaudoin et al., 2020), especially when they hold negative beliefs about the motor abilities of older adults (Beaudoin et al., 2020). This suggests that representations of aging may be associated with the effects of fictional aging on motor performance. In the same way that embodying an older adult avatar in virtual reality modifies the motor performance of younger adults, the knowledge that wearing the suit has an aging effect may influence motor performance. However, in contrast to virtual reality, modifying the way the aging suit is presented may conceal its aging properties. By comparing the motor performances of younger adults wearing aging suits presented in different ways, it may be possible to demonstrate the impact of knowledge about aging on motor performance.

Importantly, researchers have started to investigate the effects of the aging suit on younger adults' cognitive performance, compared with that of older adults (Schaefer et al., 2022; Vieweg

et al., 2023; Vieweg & Schaefer, 2020). Moutoussamy et al. (in press) recently suggested using this tool for research on cognitive aging from an embodied and situated perspective. This vision of cognition suggests that cognition originates in the body and in the interactions between the body and the environment. Thus, the cognitive changes observed in older adults may be linked to their sensorimotor decline. To study this with the help of an aging suit, it is fundamental to ensure that the suit reproduces the motor changes observed in advancing age. In addition, given the important relationships between the environment, the body, and cognition suggested by the embodied and situated approach, it would be interesting to manipulate the environment in order to explore its effects on the motor performance of younger adults wearing the suit. These possible relationships between body and environment could then inform future studies of cognition.

The two objectives of the present study were to confirm the effects of the aging suit on motor skills, and to identify possible differences in these effects depending on how the suit was presented. First, we sought to confirm and deepen the results obtained by Vieweg and Schaefer (2020). We expected to observe an increase in the time required to perform the motor tasks when participants wore the suit. We controlled for prior physical activity in the analyses we conducted, whereas this factor was not taken into account in the studies described above (mentioned as a limitation solely by Schaefer et al., 2022; Vieweg & Schaefer, 2020, who only interviewed sports students), despite its importance in terms of motor performance. We assumed that prior physical activity would lessen the effects of the aging suit on motor skills. Second, we sought to explore the effects of the aging suit on motor performance depending on how it was presented. We expected that more time would be required to perform the motor tasks when the suit was worn if the instructions given to participants mentioned aging.

2. METHODS

2.1. POPULATION

Based on Vieweg and Schaefer (2020)'s results, we ran a priori analyses to test for differences between groups (two groups, intergroup factor) and conditions (two conditions, intragroup factor), with a medium effect size (f = 0.40), an alpha of 0.05, and a correlation among repeated measures of r = .50. Results indicated that at least 52 participants would be required to achieve a power of 0.80 for the interaction effect (i.e., 26 people per group). However, this sample size was estimated on the basis of expected motor effects. As the present study featured an additional variable of interest compared with previous studies, a larger sample size was required.

A total of 98 students from Tours University (France) took part in the present study on a voluntary basis (two-month experimental period). They were divided into two groups: a group where no information on aging was given (*posture training suit*; $n = 49$); and a group where the aging properties of the suit were highlighted (*aging suit*; $n = 49$). None of the participants in the posture training suit group indicated any familiarity with the aging suit at the end of the study. Participants whose motor response times for any of the four tasks described below differed by more than 2.5 standard deviations (*SD*s) from the mean were excluded from the statistical analyses ($n = 3$). Thus, the posture training suit group comprised 47 younger adults, and the aging suit group 48 younger adults. Demographic characteristics (age, education level, percentage of women, height and weight) for each group are set out in **Table 1**. No significant differences were found between the groups regarding age, $t(93) = 0.83$, $p = .41$, education level, $t(93) = 0.50$, $p = .61$, sex ratio, Pearson's $chi^2 = 1.36$, $p = .24$, height, $t(93) = -1.46$, $p = .15$, or weight, $t(93) = -0.94$, $p = .35$. All participants reported being in good health: none of them had neurological problems, needed walking aids (e.g., cane, wheelchair), reported motor difficulties related to chronic or acute pain, or experienced dizziness or limb numbness during the experiment. The entire study was approved by the institutional review board of Tours University (no. 2021-09-01).

Table 1. Mean (and standard deviation) participants' demographic characteristics

	Posture training group ($n = 47$)	**Aging suit group ($n = 48$)**
Age in years	21.11 (2.22)	21.54 (2.86)
Educational level in years	13.19 (1.69)	13.37 (1.85)
% women	54.69 %	45.31 %
Height in cm	169.34 (9.47)	166.81 (7.30)
Weight in kg	63.38 (12.19)	61.25 (9.79)

2.2. MATERIAL

2.2.1. GERT AGING SUIT

The GERT aging suit (Produkt + Projekt Wolfgang Moll, Niederstotzingen, Germany) was used to reproduce physical aging in participants. At the sensory level, the GERT suit features 1) yellow-tinted glasses to reduce the visual field and induce a different perception of colors as well as contrast difficulties, 2) headphones to limit hearing, and 3) gloves to reduce tactile sensation. At the motor level, it features (1) a cervical collar to reduce head motor skills, 2) elbow and knee

pads to restrict mobility and reproduce joint stiffness, 3) wrist weights (1.5 kg per wrist) and ankle weights (2.3 kg per ankle) for loss of strength, impaired coordination and uncertain gait, 4) gloves to restrict hand mobility and decrease agility, 5) overshoes to simulate hesitant gait and loss of balance when walking, and 6) a 10-kg vest to induce spinal curvature, mobility restriction, loss of strength, and impaired sense of balance. To achieve a vest weight representing 10% of each participant's weight, 250-g weights can be removed if needed. Thus, for the first time in such studies, we modulated the difficulty in an interindividual way.

2.2.2. MOTRICITY TASKS

The Test of Motor Competence (Sigmundsson et al., 2016) was used to measure participants' level of motor skills. This test battery is composed of four tasks (summarized in Fig. 1) for which completion times are recorded: two measuring fine motor skills, and two measuring gross motor skills. Each task starts with a training session.

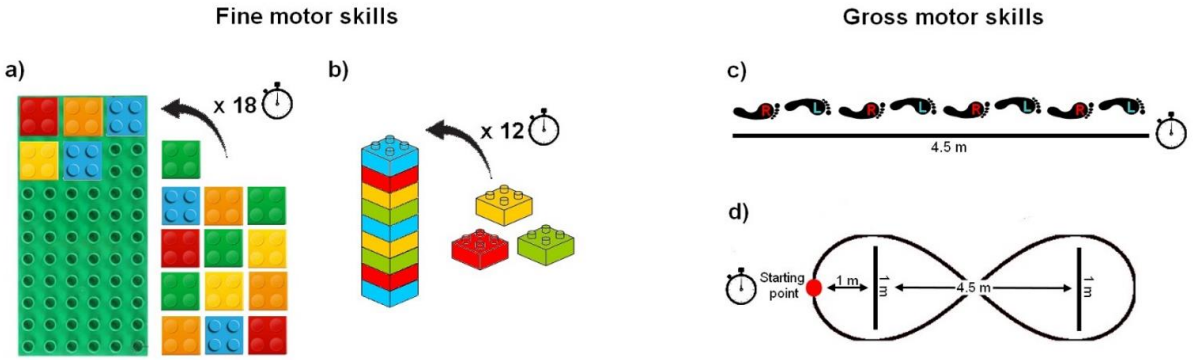


Figure 1. Four measures of motricity included in the Test of Motor Competence (adapted from Sigmundsson et al., 2016)

Concerning *fine motor skills*, the tasks measured the speed and sureness of the movement, hand-to-hand coordination, and hand-to-eye coordination. The first fine motor task (i.e., *placing bricks*, PB, Fig 1.A) required participants to place 18 square Duplo^{TM} bricks on a board as quickly as possible. This task is performed with the right hand first, then the left hand. Mean completion time (in s) for the two hands is used as a measure of interest. The second fine motor task (i.e., *building bricks*, BB, Fig 1.B) involves stacking 12 Duplo^{TM} bricks on top of each other as quickly as possible. During this task, neither hand must be placed on the table, and the bricks must be constantly raised. The time (in s) required to build the tower is recorded. The first task assesses the speed and sureness of the hand movements, while the second task focuses on the coordination between the two hands to perform a single action. Both tasks also measure hand-to-eye coordination.

Concerning *gross motor skills*, the tasks consider dynamic balance skills, mobility and walking maneuvers, speed and safety of movement, and agility. In the first task (i.e., *heel-to-toe walking*, HTW, Fig 1.C), participants walk along a straight line (4.5 m long) as fast as possible. The walk must be done in tandem gait (i.e., the heel must be placed against the toes of the other foot at each step). The time (in s) taken to walk the 4.5-m line is recorded. For the second task (i.e., *figure-of-eight walking/running*, W/R, Fig 1.D), a figure-of-eight around two 1-meter lines must be performed as fast as possible. The first line is 1 meter from the starting point, and the second line is 5.5 meters from the starting point. The time (in s) required to complete the figure-of-eight is recorded. The first task assesses gait, balance and coordination during a precision task, while the second assessed the ability to accelerate and decelerate in a rapid movement that includes changes of direction. Both tasks assess dynamic balance and agility during controlled movements.

2.2.3. PHYSICAL ACTIVITY QUESTIONNAIRE

The Historical Leisure Activity Questionnaire (Kriska et al., 1988) was used to assess prior physical activity over a typical week. Responses to this self-report questionnaire allowed us to calculate a cumulative index representing mean energy expenditure in metabolic equivalent (MET) per minute per week (Ainsworth et al., 2000), perceived intensity (light, moderate, vigorous), duration, and frequency of physical activity. We calculated it as follows:

$$\sum [METs\ x\ session\ duration\ (in\ min)\ x\ frequency\ during\ the\ week]$$

2.3. PROCEDURE

First, participants completed the inclusion and prior physical activity questionnaires. They then performed the motor tasks twice: once without the aging suit and once with it. Before each motor task, participants performed a training session for which no times were recorded, to ensure that they correctly understood the instructions. They indicated when they were physically ready to perform each task. The conditions were counterbalanced, with half the volunteers starting with the suit, and half without it. The aging suit was presented in two different ways, depending on whether the aging aspect was evoked. For the aging suit group, the instruction was as follows: “We are going to fit you with an aging suit, and you will be in the skin of an older adult”. For the posture training suit group, the purpose of the suit was hidden: “We are going to fit you with a suit that trains your posture”.

2.4. STATISTICAL ANALYSES

Group characteristics (age, education level, height, weight, and physical activity index) were compared using an independent *t* test. Generalized linear model analyses were performed on each of the four motor measures, with condition (with vs. without suit) as a within-participants factor, group (posture training vs. aging suit) as a between-participants factor, and physical activity index as a continuous control variable. The effect, if any, of this variable was clarified with correlation analyses.

3. RESULTS

The means and standard deviations for the physical activity index, as well as for each motor task measure, are shown in **Table 2**. The physical activity index was equivalent across the two groups, $t(93) = -0.39$, $p = .70$.

For the PB task, generalized linear model analysis indicated a significant effect of condition, $F(1, 92) = 131.49$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.59$, confirming that brick placement time increased when the suit was worn. A trend toward significance was found for the effect of group, $F(1, 92) = 3.61$, $p = .06$, $\eta^2_p = 0.04$, indicating that the brick placement time in the posture training suit group could be shorter than in the aging suit group. However, the interaction between condition and group was not significant, $F(1, 92) = 0.12$, $p = .73$: the effect of condition on motor performance was no greater in the aging suit group than in the posture training suit group. Moreover, prior physical activity had a beneficial effect on motor performance, $F(1, 92) = 5.36$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.06$, indicating that the more physically active the participant, the shorter the time required to place the bricks. This benefit of physical activity did not vary according to condition, as the interaction between the two was not significant, $F(1, 92) = 0.09$, $p = .77$.

Concerning the BB task, we observed an effect of condition, $F(1, 92) = 78.79$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.46$, with a longer building time when the suit was worn. Building time differed significantly according to group, $F(1, 92) = 5.52$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.06$, as it was shorter in the posture training suit group than in the aging suit group. The effect of condition did not vary according to group, $F(1, 92) = 0.15$, $p = .70$. Thus, the effect of condition on motor performance was comparable across the aging suit and posture training suit groups. For this task, physical activity was also associated with shorter building time, $F(1, 92) = 5.88$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.06$. This variable did not interact with condition, $F(1, 92) = 0.01$, $p = .91$, indicating that the benefit of physical activity did not vary whether or not the participant wore the suit.

Concerning the HTW task, we observed an effect of condition, $F(1, 92) = 59.46$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.39$, with longer walking time when participants wore the aging suit. A trend toward significance was observed for group, $F(1, 92) = 3.70$, $p = .06$, $\eta^2_p = 0.04$, with a marginally shorter walking time for the posture training suit group than for the aging suit group. The Condition x Group interaction was not significant, $F(1, 92) = 2.80$, $p = .09$. Finally, physical activity had a beneficial effect on motor performance in this task, $F(1, 92) = 5.39$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.06$, whether or not the suit was worn, $F(1, 92) = 0.59$, $p = .44$.

Finally, for W/R task, results revealed an effect of condition, $F(1, 92) = 210.48$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.70$, with poorer performance when the suit was worn. There was a significant effect of group, $F(1, 92) = 11.54$, $p = .001$, $\eta^2_p = 0.11$, with significantly longer walking/running time for the aging suit group than for the posture training suit group. The Condition x Group interaction was significant, $F(1, 92) = 5.74$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.06$, indicating that the effect of condition differed according to group. More specifically, walking/running time was slightly longer in the aging suit group than in the posture training suit group when the suit was not worn, $F(1, 92) = 7.92$, $p = .006$, and this difference became significant when the suit was worn, $F(1, 92) = 12.78$, $p < .001$. Physical activity elicited marginally faster walking/running time, $F(1, 92) = 3.64$, $p = .06$, $\eta^2_p = 0.04$. This beneficial effect was different when the suit was worn, as there was a significant Physical activity x Condition interaction, $F(1, 92) = 4.95$, $p = .03$, $\eta^2_p = 0.05$. The correlation analyses performed to describe this interaction indicated that walking/running time was shorter for the most physically active participants when they wore the suit, $r = -0.23$, $p = .03$. By contrast, when they did not wear the suit, correlation analyses failed to reveal any significant relationship between physical activity and walking/running time, $r = -0.14$, $p = .19$.

4. DISCUSSION

The present study confirmed that the aging suit effectively reduces the motor skills of younger adults, as reflected in performances on both fine and gross motor tasks (Gaggioli et al., 2018; Lavallière et al., 2017; Schaefer et al., 2022; Vieweg & Schaefer, 2020), and demonstrated that these effects can vary according to how the suit is presented – a result that had never been shown before.

The gross motor performances of younger adults wearing the suit varied according to group (posture training suit vs. aging suit), particularly on the W/R task. More specifically, for this task, the reduction in motor performance associated with wearing the suit was greater when the presentation of the suit referred to aging, rather than to posture training. By contrast, the

Table 2. Mean (and standard deviation) participants' score in physical activity questionnaire and in motor competences tasks for each group (posture training *vs.* aging suit) and for each condition (without and with the suit)

	Posture training suit group (n = 47)			Aging suit group (n = 48)		
Physical activity index	2145.97 (2041.57)			1990.62 (1829.32)		
	Without suit	*With suit*	*% of changes*	*Without suit*	*With suit*	*% of changes*
Placing bricks (mean for both hand in seconds)	20.23 (1.99)	25.71 (3.50)	-20.47%	21.15 (2.38)	26.84 (3.74)	-20.26%
Building bricks (in seconds)	10.90 (1.43)	14.12 (2.87)	-20.77%	11.81 (2.06)	15.21 (2.81)	-21.20%
Heel-to-toe walking (in seconds)	9.38 (2.57)	11.76 (3.35)	-17.97%	10.04 (2.48)	13.35 (3.68)	-23.00%
Figure-of-eight walking/running (in seconds)	5.54 (0.76)	7.19 (1.01)	-22.40%	6.32 (1.71)	8.47 (2.23)	-24.78%

reduction in motor performance was the same, regardless of suit instruction, for fine motor tasks (PB and BB). The embodied and situated approach assumes that motor skills, environment (social, cultural, physical), and cognition are related. This means that the effects of the aging suit on motor performance could depend on the environmental information provided. Two main complementary assumptions have emerged from the literature to explain the effect of the aging suit on motor performance: a modification of the social environment (how the suit is presented), and a modification of the physical environment (type of motor task).

In the present study, the social environment was modified by highlighting or concealing the aging properties of the suit during its presentation. The Group x Condition interaction observed in the W/R task can be explained by the activation of knowledge about aging, which is mostly negative as far as motor skills are concerned. The negative effects of stereotypes on motor performances have been demonstrated not only in older adults (Barber et al., 2020b; Chiviacowsky et al., 2018; Swift et al., 2012), but also in younger adults placed in a fictional aging situation using virtual reality (Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015). The impact of the aging suit on motor performance could therefore also be associated with internalized negative stereotypes. Future studies could take this idea further by exploring the effects of negative stereotypes on physical abilities within an aging suit group. We would expect participants with highly negative stereotypes to have poorer motor performances than participants with less negative stereotypes, but only if the suit was presented as an aging tool.

The physical environment (e.g., difficulty of the motor task) may also influence task performance, which would explain why the Group x Condition interaction was only observed in the W/R task. The latter can be considered riskier in terms of balance and falls. Younger adults wearing the aging suit may therefore have adopted conservative strategies (underestimation of their own performance), in order to create a margin of safety with regard to balance and the risk of falling (Schaefer et al., 2022). Conversely, the presentation of the suit as being for *posture training* purposes may have led to the adoption of different strategies that did not require participants to underestimate their performance. This hypothesis merits further investigation to confirm that the way the aging suit is presented modifies the type of strategy used. For example, Schaefer et al. (2022) proposed using the term *challenge suit*, which we eschewed in favor of a more neutral one. The *challenge* label could also lead to changes in strategies, by increasing participants' motivation to surpass their motor abilities in the task (i.e., as a challenge). Future studies are needed to elucidate this issue, by assessing the relationship between strategies and motor performance in more or less complex tasks performed by groups

of volunteers presented with different labels (*aging suit* for a negative view, *posture training suit* for a neutral view, and *challenge suit* for a positive view).

The modification of the social environment (i.e., how the suit was presented) associated with a more complex physical environment (i.e., type of motor task) may have resulted in a greater effect of group, particularly for the W/R task. The results of the present study suggested that the physical and social environment influences motor skills. The embodied and situated approach indicates that cognition also depends on these two domains. This is especially relevant for W/R, as this is a complex motor task that also involves cognitive components, such as planning and navigation abilities (Hess et al., 2010). Future studies should also explore the relationship between cognition, environment, and motor skills in greater detail, to better understand the importance of the environment.

As motor skills were being assessed, we controlled for prior physical activity in this study. Results indicated that physical activity had a beneficial effect on motor performance, regardless of whether the aging suit was worn (except for W/R). This suggests that there is interindividual variability in motor performance in relation to physical activity. More specifically, the literature shows that physical activity makes it possible to maintain good motor performance despite the physical changes associated with advancing age. Older adults who engage in more physical activity do not have such a steep decline in motor skills (Buchman et al., 2007).

Regarding the effects of prior physical activity on motor performance, depending on whether the aging suit was worn, we suggested two main hypotheses. The first one predicted that the effect of physical activity would not differ according whether or not participants were wearing the aging suit. During the aging process, physical activity has a beneficial and protective effect on people's gradually declining motor functions (Buchman et al., 2007), thus limiting the effects of age on them. The suit, by contrast, diminishes motor performance at a given point in time, and therefore represents the physical aging of the people wearing it according to their current motor skills and in relation to their current physical activity. The effects of the suit are therefore sudden, not gradual. Thus, the beneficial effects of physical activity on motor skills cannot be translated into an interaction, owing to the short timeframe. In the present study, where younger adults were placed in a fictional aging situation through the wearing of a suit for just 15 minutes, there was no interaction between condition and physical activity for three of the four tasks: both of the fine motor tasks and one of the gross motor tasks (HTW).

The second hypothesis, however, did not exclude the possibility of physical activity moderating the effects of the suit. First, we can assume that this moderation only occurred for tasks requiring more physical training, such as the W/R task in the present study. The latter can be likened to a race, and therefore involves the physical abilities enhanced by most physical activities (e.g., cardiovascular capacity, speed, but also motivational aspects). Furthermore, as previously mentioned, physical activity has a protective role over time for older adults, so although the aging suit may not be able to reproduce this effect in the short term, it might be able to do so with a longer wearing time. More specifically, the modification of motor performance in younger adults as a result of wearing the aging suit might depend on physical activity practice if the suit was worn for a longer period, as this would allow participants to adapt to it. The most active younger adults would presumably be less affected by the aging suit over the long term because of their physical activity.

5. CONCLUSION

In conclusion, aging suit reduces the motor performance of younger adults. Moreover, under certain environmental conditions, this reduction seems to be accentuated by the way the suit is presented, particularly when a reference is made to aging. This is very relevant, as it questions the effects observed in other studies and highlights the impact of the environment (knowledge of aging, adaptation of strategy choice to task difficulty) on motor performance. The battery of motor tasks used in this study was particularly useful for capturing the dynamic aspects of everyday motor skills. However, as the norms for these tasks are still underdeveloped and rarely used in studies among older adults, it might be useful to assess the motor changes induced by the aging suit in tasks classically used in physical aging studies. Although this was not one of the objectives of the present study, it would be interesting to compare the performances we observed in younger adults in these two conditions with those of older adults, in order to quantify the extent of this effect more accurately.

References

1. Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz, A. M., Strath, S. J., O'Brien, W. L., Bassett, D. R., Schmitz, K. H., Emplaincourt, P. O., Jacobs, D. R., & Leon, A. S. (2000). Compendium of Physical Activities : An update of activity codes and MET intensities. Medicine & Science in Sports & Exercise, 32(Supplement), S498-S516. https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009
2. Barber, S. J., Hamel, K., Ketcham, C., Lui, K., & Taylor-Ketcham, N. (2020). The effects of stereotype threat on older adults' walking performance as a function of task difficulty and

resource evaluations. Psychology and Aging, 35(2), 250-266. https://doi.org/10.1037/pag0000440

3. Beaudoin, M., Barra, J., Dupraz, L., Mollier-Sabet, P., & Guerraz, M. (2020). The impact of embodying an “elderly” body avatar on motor imagery. Experimental Brain Research, 238(6), 1467-1478. https://doi.org/10.1007/s00221-020-05828-5

4. Bouazzaoui, B., Follenfant, A., Ric, F., Fay, S., Croizet, J.-C., Atzeni, T., & Taconnat, L. (2016). Ageing-related stereotypes in memory : When the beliefs come true. Memory, 24(5), 659-668. https://doi.org/10.1080/09658211.2015.1040802

5. Boudjemad, V., & Gana, K. (2009). L’âgisme : Adaptation française d’une mesure et test d’un modèle structural des effets de l’empathie, l’orientation à la dominance sociale et le dogmatisme sur l’âgisme. Canadian Journal on Aging / La Revue canadienne du vieillissement, 28, 371-389. https://doi.org/10.1017/S071498080999016X

6. Bowden, A., Wilson, V., Traynor, V., & Chang, H. (2020). Exploring the use of ageing simulation to enable nurses to gain insight into what it is like to be an older person. Journal of Clinical Nursing, 29(23-24), 4561-4572. https://doi.org/10.1111/jocn.15484

7. Buchman, A., Boyle, P., Wilson, R., Bienias, J. L., & Bennett, D. (2007). Physical activity and motor decline in older persons. Muscle & Nerve, 35(3), 354-362. https://doi.org/10.1002/mus.20702

8. Chalabaev, A., Emile, M., Corrion, K., Stephan, Y., Clément-Guillotin, C., Pradier, C., & d’Arripe-Longueville, F. (2013). Development and Validation of the Aging Stereotypes and Exercise Scale. Journal of Aging and Physical Activity, 21(3), 319-334. https://doi.org/10.1123/japa.21.3.319

9. Chasteen, A. L., Bhattacharyya, S., Horhota, M., Tam, R., & Hasher, L. (2005). How Feelings of Stereotype Threat Influence Older Adults’ Memory Performance. Experimental Aging Research, 31(3), 235-260. https://doi.org/10.1080/03610730590948177

10. Cheng, W. L.-S., Ma, P. K., Lam, Y. Y., Ng, K. C., Ling, T. K., Yau, W. H., Chui, Y. W., Tsui, H. M., & Li, P. P. (2020). Effects of Senior Simulation Suit Program on nursing students’ attitudes towards older adults: A randomized controlled trial. Nurse Education Today, 88, 104330. https://doi.org/10.1016/j.nedt.2020.104330

11. Chiviacowsky, S., Cardozo, P. L., & Chalabaev, A. (2018). Age stereotypes’ effects on motor learning in older adults : The impact may not be immediate, but instead delayed. Psychology of Sport and Exercise, 36, 209-212. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.02.012

12. Eymard, A. S., Crawford, B. D., & Keller, T. M. (2010). “Take a Walk in My Shoes” : Nursing Students Take a Walk in Older Adults’ Shoes to Increase Knowledge and Empathy. Geriatric Nursing, 31(2), 137-141. https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2010.02.008

13. Frison, A.-K., Aigner, L., Wintersberger, P., & Riener, A. (2018). Who is Generation A? : Investigating the Experience of Automated Driving for Different Age Groups. Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 94-104. https://doi.org/10.1145/3239060.3239087

14. Gaggioli, A., Settimi, C., Cipresso, P., Pedroli, E., Stramba-Badiale, M., & Riva, G. (2018). Using an Aging Simulator Suit for Modeling Visuo-Motor Limitations of Elderly Users Interacting with a Mobile Application: Feasibility Study. In P. Cipresso, S. Serino, Y. Ostrovsky, & J. T. Baker (Éds.), Pervasive Computing Paradigms for Mental Health (Vol. 253, p. 24-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01093-5_4

15. Groza, H. L., Sebesi, S. B., & Mandru, D. S. (2017). Age Simulation Suits for Training, Research and Development. In International Conference on Advancements of Medicine and

Health Care through Technology; 12th—15th October 2016, Cluj-Napoca, Romania (Vol. 59, p. 77-80). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52875-5_17

16. Hess, T. M., Auman, C., Colcombe, S. J., & Rahhal, T. A. (2003). The Impact of Stereotype Threat on Age Differences in Memory Performance. The Journals of Gerontology: Series B, 58(1), P3-P11. https://doi.org/10.1093/geronb/58.1.P3

17. Hess, R. J., Brach, J. S., Piva, S. R., & VanSwearingen, J. M. (2010). Walking skill can be assessed in older adults: validity of the Figure-of-8 Walk Test. Physical therapy, 90(1), 89–99. https://doi.org/10.2522/ptj.20080121

18. Hsu, H.-C., Lee, C. Y., & Lee, C. H. (2016). Effects of Aging Simulation Program on Nurses' Attitudes and Willingness toward Elder Care. Taiwan Geriatr Gerontol, 11(2), 105-115.

19. Jeong, H., & Kwon, H. (2021). Long-term effects of an aging suit experience on nursing college students. Nurse Education in Practice, 50, 102923. https://doi.org/10.1016/j.nepr.2020.102923

20. Kriska, A. M., Sandler, R. B., Cauley, J. A., Laporte, R. E., Hom, D. L., & Pambianco, G. (1988). The assessment of historical physical activity and its relation to adult bone parameters. American Journal of Epidemiology, 127(5), 1053-1063. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114881

21. Lafayette Instrument. (2015). Purdue Pegboard Test. User instructions.

22. Lauenroth, A., Schulze, S., Ioannidis, A., Simm, A., & Schwesig, R. (2017). Effect of an Age Simulation Suit on Younger Adults' Gait Performance Compared to Older Adults' Normal Gait. Research in Gerontological Nursing, 10(5), 227-233. https://doi.org/10.3928/19404921-20170831-04

23. Laurentius, T., Quandel, J., Bollheimer, L. C., Leonhardt, S., Ngo, C., & Lüken, M. (2022). Spatiotemporal gait parameters in young individuals wearing an age simulation suit compared to healthy older individuals. European Review of Aging and Physical Activity, 19(1), 29. https://doi.org/10.1186/s11556-022-00298-w

24. Lavallière, M., D'Ambrosio, L., Gennis, A., Burstein, A., Godfrey, K. M., Waerstad, H., Puleo, R. M., Lauenroth, A., & Coughlin, J. F. (2017). Walking a mile in another's shoes : The impact of wearing an Age Suit. Gerontology & Geriatrics Education, 38(2), 171-187. https://doi.org/10.1080/02701960.2015.1079706

25. Lee, S. W. H., & Teh, P.-L. (2020). "Suiting Up" to Enhance Empathy Toward Aging: A Randomized Controlled Study. Frontiers in Public Health, 8, 376. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00376

26. Levy, B., Ashman, O., & Dror, I. (2000). To be or Not to be: The Effects of Aging Stereotypes on the Will to Live. OMEGA - Journal of Death and Dying, 40(3), 409-420. https://doi.org/10.2190/Y2GE-BVYQ-NF0E-83VR

27. Lineweaver, T. T., Kugler, J., Rabellino, A., & Stephan, Y. (2018). Beliefs about age-related changes in physical functioning across the adult life span and their relationship with physical activity levels of older adults. Aging, Neuropsychology, and Cognition, 25(4), 613-631. https://doi.org/10.1080/13825585.2017.1356903

28. Mazerolle, M., Régner, I., Morisset, P., Rigalleau, F., & Huguet, P. (2012). Stereotype threat strengthens automatic recall and undermines controlled processes in older adults. Psychological Science, 23(7), 723-727. https://doi.org/10.1177/0956797612437607

29. Moll, W. (2020). GERonTologic simulator GERT. Wolfgang Moll. https://www.age-simulation-suit.com/

30. Moutoussamy, I., Taconnat, L., Villatte, J., Toussaint, L., & Pothier, K. (in press). Etudier le vieillissement mnésique d'un point de vue incarné : réflexions théoriques sur l'apport des simulateurs de vieillissement [Studying memory aging from an embodied point of view: reflections on the contribution of aging suits]. L'Année Psychologique [Topics in Cognitive Psychology]

31. Ono, Y., Iwayama, K., Tanaka, E., Ashida, T., & Komasa, Y. (2017). Learning effects of aging simulation-based training Analysis using text mining. Journal of Osaka Dental University, 51(2), 5. https://doi.org/10.18905/jodu.51.2_131

32. Paraskevoudi, N., Balcı, F., & Vatakis, A. (2018). "Walking" through the sensory, cognitive, and temporal degradations of healthy aging: Multisensory processing in aging. Annals of the New York Academy of Sciences, 1426(1), 72-92. https://doi.org/10.1111/nyas.13734

33. Reinhard, R., Shah, K. G., Faust-Christmann, C. A., & Lachmann, T. (2020). Acting your avatar's age: Effects of virtual reality avatar embodiment on real life walking speed. Media Psychology, 23(2), 293-315. https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1598435

34. Rikli, R., & Jones, J. (1999). Development and validation of a functional fitness test for a community residing adults. Journal of Aging and Physical Activity, 7(2), 129-161. https://doi.org/10.1123/japa.7.2.129

35. Sari, D., Taskiran, N., Baysal, E., Acar, E., & Cevik Akyil, R. (2020). Effect of an aged simulation suit on nursing students' attitudes and empathy. European Geriatric Medicine, 11(4), 667-675. https://doi.org/10.1007/s41999-020-00316-z

36. Schaefer, S., Bill, D., Hoor, M., & Vieweg, J. (2022). The influence of age and age simulation on task-difficulty choices in motor tasks. Aging, Neuropsychology, and Cognition, 1-26. https://doi.org/10.1080/13825585.2022.2043232

37. Scherf, C. (2014). Entwicklung, Herstellung und Evaluation des Modularen Alterssimulationsanzugs eXtra (MAX). Universitätsverlag Chemnitz.

38. Schmidt, L. I., Schlomann, A., Gerhardy, T., & Wahl, H.-W. (2022). "Aging Means to Me… That I Feel Lonely More Often"? An Experimental Study on the Effects of Age Simulation Regarding Views on Aging. Frontiers in Psychology, 13, 806233. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.806233

39. Sigmundsson, H., Lorås, H., & Haga, M. (2016). Assessment of Motor Competence Across the Life Span: Aspects of Reliability and Validity of a New Test Battery. SAGE Open, 6(1), 215824401663327. https://doi.org/10.1177/2158244016633273

40. Swift, H. J., Lamont, R. A., & Abrams, D. (2012). Are they half as strong as they used to be? An experiment testing whether age-related social comparisons impair older people's hand grip strength and persistence. BMJ Open, 2(3), e001064. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001064

41. Taşoz, Ş. M., & Afacan, Y. (2022). Simulated physical ageing: A prioritized persona-based model for accessible interiors in senior housing environments. Indoor and Built Environment, 31(8), 2115-2133. https://doi.org/10.1177/1420326X20952817

42. Tullo, E. StC., Spencer, J., & Allan, L. (2010). Systematic Review: Helping the Young to Understand the Old. Teaching Interventions in Geriatrics to Improve the Knowledge, Skills, and Attitudes of Undergraduate Medical Students: teaching interventions in geriatrics. Journal of the American Geriatrics Society, 58(10), 1987-1993. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2010.03072.x

43. Vauclair, C.-M., Borges Rodrigues, R., Marques, S., Esteves, C. S., Cunha, F., & Gerardo, F. (2018). Doddering but dear … even in the eyes of young children? Age stereotyping and

prejudice in childhood and adolescence. International Journal of Psychology, 53(S1), 63-70. https://doi.org/10.1002/ijop.12430

44. Vieweg, J., Panzer, S., & Schaefer, S. (2023). Effects of age simulation and age on motor sequence learning: Interaction of age-related cognitive and motor decline. Human Movement Science, 87, 103025. https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.103025

45. Vieweg, J., & Schaefer, S. (2020). How an Age Simulation Suit affects Motor and Cognitive Performance and Self-perception in Younger Adults. Experimental Aging Research, 46(4), 273-290. https://doi.org/10.1080/0361073X.2020.1766299

46. Wong, J. T., & Gallo, D. A. (2019). Activating Aging Stereotypes Increases Source Recollection Confusions in Older Adults: Effect at Encoding but Not Retrieval. The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences, 74(4), 633-641. https://doi.org/10.1093/geronb/gbx103

47. World Health Organization. (2022). Ageing and health. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health

48. Yoo, S.-C., Peña, J. F., & Drumwright, M. E. (2015). Virtual shopping and unconscious persuasion : The priming effects of avatar age and consumers' age discrimination on purchasing and prosocial behaviors. Computers in Human Behavior, 48, 62-71. https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.01.042

49. Zijlstra, E., Hagedoorn, M., Krijnen, W. P., van der Schans, C. P., & Mobach, M. P. (2016). Route complexity and simulated physical ageing negatively influence wayfinding. Applied Ergonomics, 56, 62-67. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.03.009

Étude 4

INCARNER UNE PERSONNE ÂGÉE PHYSIQUEMENT PEUT-IL MODIFIER LA MÉMOIRE D'ADULTES JEUNES ?

La quatrième étude s'intéresse aux effets du simulateur de vieillissement sur les processus mnésiques. Selon une approche incarnée et située de la cognition, la mémoire serait dépendante des expériences sensorimotrices (« incarnée ») et de l'interaction du corps avec l'environnement (« située ») (Barsalou, 2008). De récentes études indiquent qu'une perturbation du système moteur, par une posture interférente (i.e., main dans le dos) ou l'immobilisation d'un membre, altère la mémoire des concepts d'action (i.e., objets manipulables) d'adultes jeunes (Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Villatte et al., 2021). De la même façon, les changements mnésiques et moteurs retrouvés au cours du vieillissement pourraient être liés. En effet, il semblerait que les traces mnésiques encodées soient amoindries en éléments sensorimoteurs, les rendant moins précises et moins distinctes les unes des autres (Mille et al., 2023; Vallet, 2015).

Par ailleurs, l'environnement social joue un rôle important dans les capacités, tant motrices que mnésiques, des adultes âgés. En effet, les performances motrices et mnésiques des adultes âgés sont moins élevées lorsque des stéréotypes négatifs sur le vieillissement sont activés que lorsqu'ils ne le sont pas (e.g., Bouazzaoui et al., 2016; 2020; Mazerolle et al., 2012; Swift et al., 2012). Les stéréotypes négatifs sur le vieillissement affectent particulièrement les adultes âgés, groupe social visé par ces stéréotypes. Néanmoins, quelques études indiquent que les performances motrices et cognitives d'adultes jeunes peuvent également être modifiées lorsqu'ils sont mis en situation de vieillissement fictif par réalité virtuelle (Beaudoin et al., 2020; Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015). Ces effets sont d'autant plus importants que leurs représentations sur le vieillissement sont négatives (Beaudoin et al., 2020).

Les simulateurs de vieillissement permettent également de placer des adultes jeunes dans une situation de vieillissement fictif (Gaggioli et al., 2018; Vieweg & Schaefer, 2020). L'utilisation des simulateurs de vieillissement permet de modifier expérimentalement les aspects moteurs et environnementaux chez des adultes jeunes, afin d'étudier les effets conjoints du corps et de

l'environnement sur les performances mnésiques. L'objectif de cette étude était d'investiguer le fonctionnement de la mémoire selon une approche incarnée et située à l'aide de simulateur de vieillissement. L'étude visait à vérifier les effets du simulateur de vieillissement sur les performances motrices selon le contexte environnemental. Par la suite, les différences de performances mnésiques associées au port du simulateur de vieillissement chez des adultes jeunes en fonction du contexte environnemental ont été examinées.

Quatre groupes ont été composés : 20 adultes jeunes contrôles, 22 adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant », 21 adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement avec contexte « menaçant » et 25 adultes âgés contrôles. Trois tâches motrices, impliquant les membres inférieurs ou supérieurs, ont été réalisées. Puis, pour les groupes d'adultes jeunes concernés, le simulateur de vieillissement a été installé avec une consigne mentionnant ou non le vieillissement. Pour ceux ayant connaissance de l'effet vieillissant de la combinaison, les stéréotypes sur le vieillissement ont été activés à l'aide d'une tâche de reconstitution de phrases (contexte « menaçant »). Les participants ont ensuite réalisé une deuxième fois les mêmes tâches motrices (ordre non contrebalancé). Puis, une tâche de mémoire impliquant des verbes d'action (manuelle et podale) et de non-action a été proposée. Plus précisément, suite à un apprentissage implicite des verbes (présentés en haut ou bas de l'écran), les participants ont réalisé une tâche de reconnaissance suivie d'une récupération du contexte (emplacement du verbe à l'écran).

Des ANCOVAs à mesures répétées comprenant les facteurs groupe (quatre groupes, inter-sujets), essai (deux essais, intra-sujet) et niveau d'activité physique (activités physiques et sportives, de loisirs et de mobilité, variable contrôlée) ont mis en évidence un effet de l'âge et du simulateur sur les performances motrices. L'effet du simulateur sur les performances motrices manuelles était plus important lorsque le contexte était « menaçant ». Une ANOVA à mesures répétées comprenant les facteurs groupe (quatre groupes, inter-sujets) et catégorie de verbes (trois catégories, intra-sujet) a mis en évidence une diminution des performances mnésiques des verbes d'action manuelle chez les adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement dans un contexte « menaçant ».

L'interaction entre la motricité et l'environnement semble ainsi particulièrement importante pour l'émergence des traces mnésiques. Les apports méthodologiques et théoriques de cette étude pour de futures recherches ont été discutés.

Incarner une personne âgée physiquement peut-il modifier la mémoire d'adultes jeunes ?

Ilona Moutoussamy, Kristell Pothier, Lucette Toussaint & Laurence Taconnat

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, la notion de trace mnésique a évolué pour souligner l'importance des aspects sensorimoteurs, auparavant considérés comme de simples entrées ou sorties d'informations. Ainsi, l'approche incarnée et située de la cognition considère la mémoire comme ancrée dans le corps par des expériences sensorimotrices (approche « incarnée ») et liée à la situation dans laquelle le souvenir est créé (approche « située ») (Barsalou, 2008). Une simulation mentale de l'interaction avec un stimulus (incluant des éléments sensoriels et moteurs des expériences passées) serait automatiquement créée lors de la perception d'un stimulus puis réactivée lors de la récupération de l'évènement (Barsalou, 2008; Körner et al., 2015). Cette simulation sensorimotrice serait proche de l'interaction réelle puisque des régions cérébrales similaires seraient activées lors de la perception (présence d'éléments sensorimoteurs) et de la récupération en mémoire par simulation sensorimotrice (absence d'éléments sensorimoteurs) (Barsalou, 2008; Körner et al., 2015).

En ce sens, une perturbation motrice (ou sensorielle) entraînerait une modification mnésique. Différents paradigmes de perturbation motrice périphérique ont été utilisés afin de souligner les changements cognitifs consécutifs à cette perturbation motrice. Le premier est un paradigme de posture interférente, dans lequel ce type de posture (par ex. les mains sont croisées dans le dos du participant et donc non disponibles) est comparé à une posture de contrôle (par ex. les mains sont placées devant le participant et donc disponibles). Dans ce paradigme spécifique, Dutriaux et Gyselinck (2016) ont montré que le rappel d'objets était affecté par une posture interférente par rapport à une posture contrôle, uniquement lorsque les objets à mémoriser étaient considérés comme manipulables. Cette posture interférente modifierait également l'activité cérébrale au niveau du cortex moteur pendant la récupération des concepts d'action manuelle (i.e., rythme béta associé au traitement cognitif des concepts d'action, de Vega et al., 2021). Deuxièmement, le paradigme d'immobilisation consiste à immobiliser une partie du corps (par ex. avant-bras et main dominante) pendant un certain temps. À l'aide de ce paradigme, Villatte et al. (2021) ont montré qu'un groupe contrôle (non immobilisé) avait un temps de réponse plus long pour

le rappel d'objets manipulables (par rapport à des objets non manipulables), une différence qui n'a pas été observée pour le groupe immobilisé. Les auteurs suggèrent qu'un temps supplémentaire est nécessaire pour l'activation des éléments moteurs associés à l'objet manipulable lors de sa récupération dans le groupe contrôle. Dans le groupe immobilisé, cette activation supplémentaire serait supprimée car le système sensorimoteur est modifié par l'immobilisation. Ces deux études mettent en évidence une modification du fonctionnement de la mémoire lorsque la motricité est perturbée. En ralentissant le traitement sensorimoteur, l'interférence de la posture et de l'immobilisation ralentiraient à leur tour la récupération des traces mnésiques concernant les concepts d'action.

L'approche incarnée et située semble particulièrement intéressante lorsque l'on étudie le vieillissement. En effet, l'avancée en âge est marquée par de nombreux changements, tant sensorimoteurs que cognitifs, et notamment mnésiques. Les modifications mnésiques sont classiquement expliquées par un déficit des fonctions exécutives (West, 1996, 2000), nécessaires à la mise en place auto-initiée de stratégies d'encodage et de récupération (par ex. pour revue voir Taconnat & Lemaire, 2014). Une explication complémentaire est apportée par l'approche incarnée et située de la cognition. Les modifications de la mémoire observées chez les adultes âgés pourraient, en partie, s'expliquer par les modifications sensorielles et motrices apparaissant au cours du vieillissement (Mille et al., 2021, 2023; Vallet, 2015). Plus précisément, les traces mnésiques encodées seraient appauvries en éléments sensorimoteurs et donc moins spécifiques, leur distinctivité moins importante, ce qui augmenterait le nombre d'erreurs commises, notamment lorsque le distracteur est visuellement proche de la cible (Boutet et al., 2019; Vallet et al., 2017).

Les quelques études investiguant les liens entre motricité et mémoire au cours du vieillissement présentent des résultats mixtes. Par exemple, Dijkstra et al. (2007) ont constaté que le rappel de souvenirs autobiographiques était facilité lorsque la position adoptée était congruente avec le souvenir. Cet effet était plus faible chez les adultes plus âgés que chez les plus jeunes, ce qui suggère que ce lien entre la motricité et la mémoire diminue au cours du vieillissement. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'une moindre « incarnation » des représentations chez les adultes âgés, suggérant que ces derniers s'appuieraient davantage sur la modalité visuelle que sur les modalités impliquant le corps (par ex. toucher, proprioception) par rapport aux adultes plus jeunes (Costello & Bloesch, 2017), et ce malgré la posture congruente adoptée par les participants de l'étude de Dijkstra et al. (2007). Récemment, Dutriaux et al. (2021) ont étudié l'effet des changements moteurs liés au vieillissement sur la mémoire des objets manipulables

en fonction de la posture. Les auteurs s'attendaient à n'observer aucun effet d'une posture interférente chez les adultes âgés puisque la simulation motrice serait déjà perturbée par les changements sensorimoteurs liés à l'avancée en âge. Cependant, les performances des adultes âgés sur des objets manipulables étaient tout aussi perturbées par la posture interférente que celles des adultes jeunes. Dans cette étude et contrairement à Dijkstra et al. (2007), le lien motricité-mémoire n'est pas affecté par le déclin moteur dans le vieillissement. Des différences méthodologiques peuvent être à l'origine de ces divergences de résultats. Par exemple, les éléments à récupérer correspondent à des souvenirs anciens (Dijkstra et al., 2007) *vs.* des objets manipulables appris durant l'expérimentation (Dutriaux et al., 2021) mais aussi le lien mémoire-motricité est investigué à l'aide d'un effet facilitateur de la posture (Dijkstra et al., 2007) *vs.* d'une perturbation motrice (Dutriaux et al., 2021)

Par ailleurs, l'approche incarnée et située de la cognition considère non seulement que les traces mnésiques sont ancrées dans le corps par les expériences sensorimotrices, mais qu'elles sont également dépendantes de l'interaction du corps avec son environnement. Cela suggère que l'environnement, physique comme social, peut influencer les processus mnésiques (Roth & Jornet, 2013). La menace du stéréotype (Steele & Aronson, 1995) est un exemple de l'influence de l'environnement social sur les capacités individuelles. Les stéréotypes sont des représentations, positives comme négatives, portant sur les caractéristiques communes d'un groupe social, tel que les adultes âgés. Les stéréotypes sur le vieillissement, internalisés depuis l'enfance, sont majoritairement négatifs dans la culture occidentale (Hummert, 2011). Ils peuvent devenir menaçants lorsque la situation présente des risques de confirmer, par son propre comportement, les stéréotypes négatifs du groupe d'appartenance (Steele, 1997).

En contexte de laboratoire, il est possible d'activer les stéréotypes afin d'étudier leurs effets sur les capacités mnésiques et motrices. Ainsi, chez les adultes âgés, la menace du stéréotype peut induire une diminution des performances mnésiques et motrices lorsque les stéréotypes négatifs sont activés comparativement à une situation contrôle où les stéréotypes ne sont pas activés (par ex. Barber et al., 2020; Bouazzaoui et al., 2016, 2020; Chiviacowsky et al., 2018; Eich et al., 2014; Mazerolle et al., 2012, 2015; Swift et al., 2012; voir Armstrong et al., 2017 pour une méta-analyse récente). La littérature suggère que les effets de la menace seraient visibles si la personne ressent appartenir au groupe visé par ces stéréotypes et lors de situations où les stéréotypes peuvent être confirmés. Les effets des stéréotypes négatifs sur le vieillissement ont donc été particulièrement étudiés chez les adultes âgés. Néanmoins, quelques études ont investigué les effets d'un vieillissement fictif sur les performances motrices et cognitives des

adultes jeunes (Beaudoin et al., 2020; Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015). Plus précisément, ces derniers ont été placés dans une situation de vieillissement fictif à l'aide de dispositif de réalité virtuelle. Les temps de déplacements mentaux dans un magasin virtuel et les déplacements réels après l'utilisation de la réalité virtuelle étaient augmentés lorsque les adultes jeunes incarnent un avatar âgé plutôt qu'un avatar jeune (Reinhard et al., 2020; Yoo et al., 2015). Dans le même ordre d'idée, le temps mis pour réaliser une tâche d'imagerie motrice était plus important lorsque les participants utilisent un avatar « âgé » comparativement à un avatar « jeune », d'autant plus si leurs représentations sur l'activité motrice des personnes âgées étaient négatives (Beaudoin et al., 2020). Aucune étude ne s'est toutefois intéressée aux performances mnésiques d'adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif à l'aide d'un avatar âgé.

De nouveaux outils, tels que les simulateurs de vieillissement, ont été créés afin de reproduire les difficultés motrices liées à l'avancée en âge (Gaggioli et al., 2018; Vieweg & Schaefer, 2020). Initialement, ces outils ont été utilisés à des fins ergonomiques (par ex. adaptation des voitures, Frison et al., 2018) ou dans les professions médicales (par ex. développement de l'empathie chez les soignants, Sari et al., 2020). Cependant, très récemment, des chercheurs ont souligné l'intérêt de cet outil dans l'étude du vieillissement cognitif (Schaefer et al., 2022; Vieweg et al., 2023; Vieweg & Schaefer, 2020, voir Moutoussamy et al., sous presse pour une revue en français). Par exemple, Vieweg et Schaefer (2020) ont montré une différence significative entre deux sessions (avec et sans simulateur) sur la vitesse de traitement (en utilisant le Digit Symbol Substitution Test, Wechsler, 1945) (voir Vieweg et al., 2023 pour des résultats différents sur cette même tâche). Cependant, le Digit Symbol Substitution Test est une tâche « papier/crayon » qui implique directement le système moteur pour répondre. Les modifications visuelles (lunettes occultantes) et motrices (poids) induites par le simulateur pourraient, à elles seules, diminuer les performances mesurées avec cette tâche. En d'autres termes, cette étude ne permet pas de distinguer les effets liés aux modifications cognitives telles que postulées par les théories incarnées de la cognition des effets dus aux difficultés sensorimotrices causées par le port du simulateur. Parmi les quelques études développées pour explorer les liens entre diminution motrice causée par le simulateur de vieillissement et cognition, aucune ne s'est intéressée aux processus mnésiques. Cette observation est étonnante puisque de plus en plus d'études suggèrent que la mémoire serait dépendante de la perception et de la motricité (Barsalou, 2008; Versace et al., 2018).

L'utilisation de simulateurs de vieillissement présente différents avantages par rapport aux méthodologies utilisées dans les précédentes études. Tout d'abord, les paradigmes de

perturbation motrice, qui pourraient être une alternative pour étudier le vieillissement de la mémoire dans ce contexte incarné et situé, ne sont pas entièrement satisfaisants car ils ne rendent compte que de changements moteurs partiels liés au vieillissement (par ex. immobilisation n'affectant que le bras dominant). De plus, les aspects situés peuvent aussi être manipulés avec les simulateurs de vieillissement, ce qui est moins évident en réalité virtuelle. Plus précisément, lorsque les individus utilisent un avatar âgé en réalité virtuelle, le lien avec le vieillissement est présent et active les connaissances sur le vieillissement. Ce rapprochement avec le vieillissement peut être dissimulé lorsqu'on présente la combinaison aux participants (i.e., le simulateur est présenté comme une combinaison modifiant la motricité ou la posture). De cette façon, les connaissances sur le vieillissement ne sont pas nécessairement activées lorsque l'individu porte le simulateur de vieillissement.

L'objectif général de cette étude était d'explorer les différences de performances mnésiques de verbes d'action dans une approche incarnée et située de la cognition, en simulant un vieillissement physique chez des adultes jeunes mis ou non dans un contexte « menaçant » (activation de stéréotypes âgistes). Dans un premier temps, l'étude visait à confirmer les effets du simulateur de vieillissement sur les performances motrices, en comparant ces performances à celles d'adultes âgés. Nous supposons que la diminution des performances motrices liée au port du simulateur de vieillissement serait plus importante lorsque les stéréotypes sont activés que lorsqu'ils ne le sont pas. Dans un second temps, l'étude visait à explorer les performances mnésiques de verbes d'action (impliquant les membres supérieurs ou les membres inférieurs) et de verbes n'impliquant aucune action, dans l'ensemble de nos groupes expérimentaux. En supposant que les traces mnésiques sont incarnées, nous nous attendons à ce qu'une perturbation motrice liée au port du simulateur affecte la mémorisation des verbes d'action uniquement. Par ailleurs, en considérant que les traces mnésiques sont incarnées et situées, nous nous attendons à ce qu'un contexte « menaçant » (activation des stéréotypes liés à l'âge) accentue les effets négatifs du simulateur de vieillissement sur les performances mnésiques des verbes d'action.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. PARTICIPANTS

Quatre-vingt-huit volontaires ont été répartis en quatre groupes : un groupe d'adultes jeunes contrôles, un groupe d'adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant », un groupe d'adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement placés dans

contexte « menaçant », et un groupe d'adultes âgés contrôles. Les participants ont été sélectionnés selon les critères suivants : (1) une absence de symptômes de dépression ou d'anxiété (score < 12 aux deux sous-échelles de l'Hospital Anxiety and Depression Scale, Zigmond & Snaith, 1983), (2) une absence de consommation de médicaments ou substances susceptibles d'affecter les capacités motrices et intellectuelles, (3) un score supérieur à 26 au Montreal Cognitive Assessment (MoCA, Nasreddine et al., 2005). Aucun participant ne présentait de difficultés motrices ou d'engourdissement des membres lors de l'expérience et aucun n'a subi d'anesthésie générale au cours des six derniers mois. Enfin, aucun ne présentait d'antécédents pathologiques, métaboliques ou psychiatriques sévères. Les caractéristiques des participants sont présentés dans la **Table 1**.

Table 1. Moyennes (écart-types) et comparaisons des caractéristiques des groupes expérimentaux

	Adultes jeunes contrôles	**Adultes jeunes avec simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant »**	**Adultes jeunes avec simulateur de vieillissement et contexte « menaçant »**	**Adultes âgés contrôles**	***p-value***
Age (en année)	27.05 (5.43)	27.00 (6.63)	25.14 (4.64)	67.12 (4.15)	
Effectif (dont femmes)	20 (15 femmes)	22 (16 femmes)	21 (9 femmes)	25 (17 femmes)	.11
Niveau d'étude (en année)	13.60 (2.09)	14.77 (2.11)	13.86 (1.98)	14.12 (3.44)	.48
Anxiété (maximum 21)	6.90 (3.01)	6.05 (3.14)	4.71 (3.15)	5.00 (3.22)	.10
Dépression (maximum 21)	5.50 (3.17)	4.77 (2.94)	5.24 (2.57)	3.72 (3.05)	.19
Vocabulaire (maximum 34)	20.65 (5.00)	23.68 (2.87)	22.05 (3.96)	27.40 (3.74)	.001
MoCA (maximum 30)				27.68 (1.52)	

Notes. Les *p-value* ont été obtenues à l'aide d'ANOVAs à un facteur, sauf pour la répartition homme-femme au sein des effectifs où un test de χ^2 a été réalisé

Les trois groupes d'adultes jeunes sont comparables en termes d'âge, $F(2,60) = 0.78$, $p = .46$. La répartition homme-femme entre nos groupes est équivalente ($\chi^2 = 6.06$, $p = .11$). Le niveau d'étude, correspondant à un nombre d'année de scolarisation, est comparable entre nos groupes expérimentaux, $F(3,84) = 0.84$, $p = .48$. Les niveaux d'anxiété et de dépression ne diffèrent dans l'ensemble des groupes, $F(3,84) = 2.16$, $p = .10$ et $F(3,84) = 1.65$, $p = .19$ respectivement. Le niveau de vocabulaire, évalué à l'aide du Mill-Hill (Deltour, 1993) diffère entre nos groupes, $F(3,84) = 12.65$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.31$, dans le sens où les adultes âgés contrôles ont un score de

vocabulaire plus élevé que les trois groupes d'adultes jeunes (p < .01 pour les trois comparaisons). Le groupe d'adultes jeunes avec simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant » a, par ailleurs, un score de vocabulaire plus élevé que le groupe d'adultes jeunes contrôles (p = .01).

2.2. MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE

Chaque participant est rencontré deux fois, avec un intervalle d'au moins une semaine entre les deux rencontres. La première partie comprend les mesures contrôles et de stéréotypes. La seconde partie du protocole comprend les mesures de motricité et de mémoire. Durant cette seconde partie, les participants jeunes portent le simulateur de vieillissement le cas échéant (temps de port de 40 minutes). Un questionnaire d'activité physique est complété entre les deux parties du protocole.

2.2.1. SIMULATEUR DE VIEILLISSEMENT

Le vieillissement physique a été reproduit chez les adultes jeunes à l'aide du simulateur de vieillissement GERT (GERontologic Test). Ce simulateur comprend un casque pour limiter l'audition, des lunettes pour réduire le champ visuel (teintées en jaune afin de modifier la perception des couleurs) et un collier cervical pour réduire les mouvements de la tête. Un gilet pouvant peser jusqu'à 10 kilogrammes permet d'induire une courbure de la colonne vertébrale, de restreindre la mobilité et d'altérer l'équilibre. Seuls 10% du poids de la personne ont été ajoutés dans le gilet. Des poids pour les poignets (1.5 kilogrammes par poignet) et des coudières induisent une perte de force, une restriction de la mobilité et une raideur des articulations. Des gants permettent de restreindre les mouvements des mains, diminuer l'agilité et la sensation tactile. Enfin, des genouillères et des poids de cheville (2.3 kilogrammes par cheville) permettent de restreindre la mobilité, d'induire une raideur articulaire et une perte de force. Des surchaussures ajoutent une démarche hésitante et compliquent l'équilibre.

2.2.2. MESURES MOTRICES

Deux tâches de motricité ont été utilisées afin d'évaluer les capacités motrices individuelles. Chaque tâche a été réalisée deux fois par les participants afin de pouvoir rendre compte des changements induits par le simulateur de vieillissement. Les deux essais sont séparés par l'installation du simulateur et l'activation des stéréotypes le cas échéant. Ainsi, pour les groupes portant le simulateur de vieillissement, le premier essai est réalisé sans le simulateur et le second avec le simulateur (ordre non contrebalancé). Les autres groupes (adultes jeunes et âgés contrôles), eux, réalisent les deux essais sans simulateur de vieillissement. Les capacités

motrices étant évaluées deux fois, un score de changement (Δ) a été calculé. Un score de changement négatif traduit une diminution des performances entre les deux essais alors qu'un score positif traduit une amélioration des performances entre les deux essais.

2.2.2.1. CAPACITÉS MOTRICES MANUELLES

Le participant doit placer un maximum de pions, un à un, sur un plateau (issu du jeu Hasbro *Mastermind*) pendant 30 secondes, avec la main droite (de gauche à droite sur des lignes de quatre pions) puis avec la main gauche (de droite à gauche sur des lignes de quatre pions). Le nombre total de pions placés est comptabilisé : plus le nombre de pions placés avec les deux mains est élevé, meilleure est la motricité manuelle. Cette tâche s'inspire du test 9-HolePeg, utilisé afin de représenter la dextérité manuelle auprès de populations variées (par ex. Hamilton et al., 2017 pour une étude chez les adultes âgés).

2.2.2.2. CAPACITÉS MOTRICES DES MEMBRES INFÉRIEURS

La *Short Physical Performance Battery* ou SPPB (Guralnik et al., 1994) a été utilisée. Cette épreuve permet de calculer un score de motricité globale à travers un test d'équilibre (noté sur quatre points, à partir de la capacité à tenir en équilibre pieds joints, en semi-tandem et en tandem durant 10 secondes), de vitesse de marche (noté sur quatre points, à partir du temps requis pour effectuer quatre mètres à un rythme de marche normal) et de lever de chaise (noté sur quatre points, à partir du temps requis pour réaliser cinq levers de chaise le plus rapidement possible). Un score total compris entre 0 et 6 indique une performance faible, entre 7 et 9 une performance intermédiaire et entre 10 et 12 une performance élevée. Plusieurs mesures ont été retenues : les scores totaux, la vitesse de marche et le temps de lever de chaise.

2.2.3. ACTIVATION ET MESURES DES STÉRÉOTYPES

2.2.3.1. ACTIVATION DES STÉRÉOTYPES

L'activation des stéréotypes négatifs sur le vieillissement est réalisée entre les deux essais des tâches motrices. Lors de l'installation du simulateur de vieillissement, deux descriptions différentes sont proposées. Pour le groupe sans contexte « menaçant », aucune indication sur l'objectif du simulateur n'est donnée : le simulateur de vieillissement est présenté comme une combinaison modifiant la motricité. Pour le groupe avec contexte « menaçant », l'objectif vieillissant du simulateur est clairement indiqué. Les groupes d'adultes jeunes et âgés contrôles n'ont pas connaissance du simulateur de vieillissement dans l'étude.

Un test de reconstitution de 24 phrases est ensuite réalisé par l'ensemble des groupes afin d'appuyer les stéréotypes liés à l'âge au sein du groupe portant le simulateur avec contexte

« menaçant » (*Scrambled Sentence Task*, issu de la thèse de Ginsberg, 2012). Pour chacune des phrases à reconstituer, six mots sont présentés dans le désordre. Parmi ces six mots, un intrus est à exclure afin de reconstituer la phrase avec les cinq mots restants. Deux versions sont proposées dépendant du groupe expérimental du participant. Pour le groupe avec contexte « menaçant », les phrases à reconstituer contiennent des stéréotypes, positifs et négatifs, associés au vieillissement (par ex. « lunettes est flou tout canard sans », le mot canard est exclu et la phrase « tout est flou sans lunettes » peut être reconstituée). Les autres groupes, y compris le groupe portant le simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant », ont un ensemble de phrases sans lien avec le vieillissement, ne permettant donc pas l'activation des stéréotypes (par ex. « gagner arrive balle elle à souvent », le mot balle est exclu et la phrase « elle arrive souvent à gagner » peut être reconstituée).

2.2.3.2. MESURES DU DEGRÉ D'ACCORD AVEC LES STÉRÉOTYPES SUR LE VIEILLISSEMENT

L'échelle d'âgisme de Fraboni ou *FSA-14*, traduit en français par Boudjemadi et Gana (2009), consiste en quatorze affirmations (par ex. « Beaucoup de personnes âgées sont avares et amassent leur argent et leurs biens ») pour lesquelles le participant doit indiquer si elles coïncident avec sa propre vision des personnes âgées sur une échelle allant de tout à fait en désaccord à tout à fait en accord (quatre points). Un score élevé indique un degré d'accord important avec les stéréotypes négatifs sur le vieillissement.

2.2.4. ACTIVITÉ PHYSIQUE

Afin de mesurer le niveau d'activité physique des participants, le *Pertinent Activities Practice in Adults* (Loggia et al., 2023) a été utilisée. Ce questionnaire inclus 75 activités, permettant de calculer quatre scores : un score d'activité physique, un score d'activité sédentaire, un score d'activité cognitive et un score d'activité sociale. Le questionnaire considère l'implication de chaque composante (physique, sédentaire, cognitive et sociale) pour chacune des activités proposées, selon leur fréquence (jamais, ≤ 2 fois par mois, 1 à 3 fois par semaine, ≥ 4 fois par semaine), durée (< 15 min, 16 à 59 min, 1 à 4 h, > 4 h) et intensité (fiable, moyenne, élevée, très élevée). L'intensité des composantes physique et sédentaire a été estimée à l'aide du compendium d'activité physique (Ainsworth et al., 2000) et l'intensité des composantes sociale et cognitive par consensus (Loggia et al., 2023). Ce questionnaire est particulièrement intéressant dans l'évaluation des activités physiques puisqu'un grand nombre d'activités impliquant les mouvements du corps est répertorié, permettant une évaluation plus complète et diversifiée qu'un questionnaire d'activité physique et sportive. En effet, des activités peu

traitées (par ex., s'occuper des petits-enfants, aller au musée) sont ajoutées aux activités sportives, de loisirs (par ex., le jardinage, le bricolage) et de mobilité (par ex., vélo, marche).

2.2.5. TÂCHE DE MÉMOIRE

Une tâche de mémoire (**Figure 1**) incluant un apprentissage implicite (par catégorisation de verbes, apparaissant à différents emplacements de l'écran) et une reconnaissance avec récupération du contexte (emplacement) a été réalisée à l'aide du logiciel *EPRIME*.

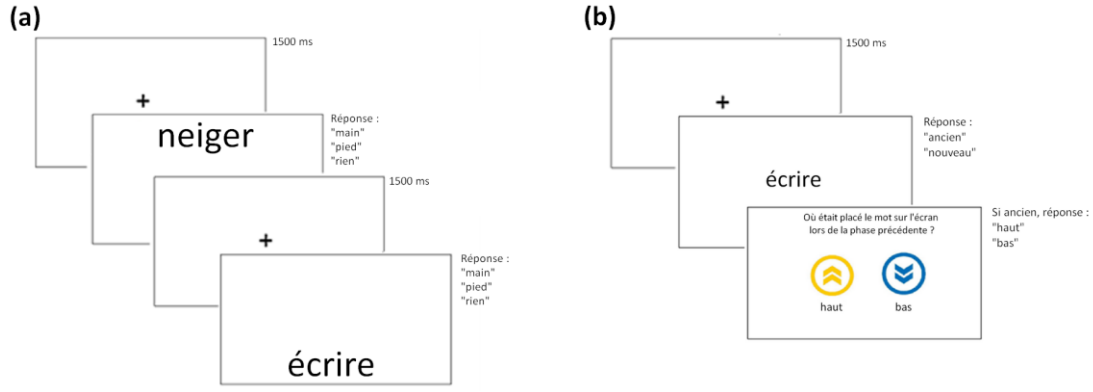


Figure 1. Procédure de la tâche de mémoire. (a) phase d'apprentissage implicite par catégorisation (b) phase de récupération, correspondant à une reconnaissance puis une récupération du contexte d'apprentissage (emplacement du verbe)

Pour cette tâche de mémoire, 57 verbes ont été sélectionnés et répartis en trois catégories : les verbes d'action impliquant les mains (par ex. écrire), les verbes d'action impliquant les pieds (par ex. pédaler) et les verbes n'impliquant pas d'action (par ex. neiger). Deux listes ont été établies à partir de ces verbes. La première liste, comprenant 42 verbes (trois sous-listes constitués de 14 verbes d'action manuelles, 14 verbes d'action podale et 14 verbes de non-action), est utilisée lors de l'apprentissage implicite par catégorisation. Les 15 verbes restants (trois sous-listes constituées de 5 verbes d'action manuelle, 5 verbes d'action podale et 5 verbes de non-action) sont ajoutés à la liste précédente lors de la phase de récupération. Les sous-listes sont équivalentes en termes de nombre de syllabes, de nombre de lettres, de fréquence ainsi que de valence émotionnelle. En revanche, les verbes de non-action sont moins concrets et moins imageables que ceux d'action (normes issus de Grégoire et al., 2023). Néanmoins, le pourcentage de catégorisation correcte est supérieur au hasard pour l'ensemble des groupes et dans chacune des catégories de verbes (> 80%), indiquant que les verbes d'action présentés ont correctement été associés à la partie du corps impliquée dans l'exécution de l'action et que les verbes de non-action ont correctement été identifiés comme n'impliquant pas directement le corps.

Lors de la phase d'apprentissage implicite, les 42 verbes sont présentés dans un ordre aléatoire, en apparaissant en haut ou en bas de l'écran (emplacement contrebalancé entre les participants). Pour chacun des verbes, le participant doit indiquer à voix haute si le verbe présenté implique l'utilisation des mains, des jambes ou d'aucune des deux propositions précédentes. Une croix de fixation apparaît pendant 1 500 ms afin que le participant se prépare à chaque item. Le verbe reste à l'écran jusqu'à la réponse du sujet, donnée oralement et enregistrée grâce à un microphone.

Durant la phase de récupération, 57 verbes (42 anciens et 15 nouveaux) sont présentés de manière aléatoire au centre de l'écran. Pour chaque verbe apparaissant à l'écran, le participant doit indiquer si le verbe est ancien (donc était présent dans la phase d'apprentissage) ou nouveau (donc n'était pas présent dans la phase d'apprentissage). Pour cela, une croix de fixation apparaît pendant 1 500 ms afin que le participant se prépare à chaque item, présenté à l'écran jusqu'à la réponse du sujet, donnée oralement et enregistrée à l'aide d'un microphone. Dans le cas où le participant indique qu'un verbe est ancien, un écran présentant les deux réponses possibles à la récupération du contexte (haut ou bas) apparaît et le participant doit préciser l'emplacement du verbe lors de la phase d'apprentissage.

Deux variables dépendantes découlent de cette tâche mnésique. Le nombre de réponses correctes correspond aux verbes anciens correctement reconnus ainsi qu'aux verbes nouveaux correctement rejetés. Les réponses étant données oralement à l'aide d'un microphone, des bugs (i.e., bruits environnants, de bouche, de réflexion) ont empêché l'enregistrement de certaines réponses des participants. Seules les performances des participants ayant un pourcentage d'essais analysables supérieur à 90% ont été analysées. Le pourcentage de réponses correctes a été calculé pour chaque catégorie de verbes, en prenant en compte le nombre de bugs micro du participant :

$$\%\ de\ bonnes\ réponses = \left[{}^{nombre\ de\ bonnes\ réponses}/_{nombre\ d'essais\ -\ nombre\ de\ bugs\ micro} \right] x\ 100$$

La récupération correcte du contexte correspond au nombre de verbes anciens correctement reconnus pour lesquels l'emplacement du verbe (haut ou bas) a été récupéré. Cette seconde variable dépendante n'a pas été analysée puisque peu de participants (n = 25) obtiennent des performances supérieures au seuil de hasard (50%), ce qui ne nous permet pas de réaliser des analyses statistiques satisfaisantes sur ces données.

2.2.6. ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel JASP (version 0.17.3.0). Les scores aux questionnaires de stéréotypes et d'activité physique des différents groupes ont été comparés à l'aide d'ANOVAs à un facteur (quatre groupes).

Afin d'évaluer les effets du simulateur de vieillissement avec ou sans contexte « menaçant » sur les performances motrices, des ANCOVAs à mesures répétées incluant le facteur « groupe » (quatre groupes, inter-sujets), le facteur « essai » (deux mesures motrices, intra-sujet) et une covariable (niveau d'activité physique, inclus afin de contrôler son effet sur les performances motrices) ainsi que des analyses de contrastes (sans correction) ont été réalisées sur chacune des mesures motrices (voir Annexes 1 à 3 pour les post-hoc avec correction de Tukey). Lorsqu'une interaction groupe x essai apparaît comme significative, des analyses de régressions linéaires simples comprenant les stéréotypes comme prédicteurs des changements moteurs entre les deux essais ont été réalisées séparément au sein des groupes expérimentaux afin de souligner l'implication différente des stéréotypes dans les changements de performances motrices entre les groupes.

Pour neuf participants, les données concernant le questionnaire d'activité physique sont manquantes (deux participants du groupe d'adultes jeunes contrôles, quatre participants du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant », un participant du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement placés dans contexte « menaçant » et deux participants du groupe d'adultes âgés contrôles). Les effectifs varient selon les analyses statistiques, qui contiennent ou non la variable activité physique (voir **Table 1**).

Afin d'évaluer les effets du simulateur de vieillissement sur la mémoire des verbes d'action (manuelle et podale) et de non-action, des ANOVAs à mesures répétées incluant le facteur groupe (quatre groupes, inter-sujets) et le facteur catégorie de verbes (trois catégories de verbes, intra-sujet) et une covariable (niveau de vocabulaire) ont été réalisées sur les performances mnésiques. Des analyses de contrastes (sans correction) ont été réalisées afin d'interpréter les effets du groupe, de la catégorie et de l'interaction groupe x catégorie de verbes (voir Annexe 4 pour les post-hoc avec correction de Tukey).

3. RÉSULTATS

Les moyennes et écart-types du niveau d'activité physique, du degré d'accord avec les stéréotypes, des performances motrices aux deux essais ainsi que des performances mnésiques

pour chacune des catégories de verbes pour chacun des groupes expérimentaux sont présentés dans la **Table 2**.

3.1. PERFORMANCES MOTRICES

La faible variabilité dans les scores globaux du *SPPB* n'a pas permis d'analyser les potentielles différences entre les groupes expérimentaux pour cette variable.

3.1.1. PERFORMANCES MANUELLES (NOMBRE DE PIONS PLACÉS)

Les moyennes des performances motrices aux deux essais pour chacun des groupes sont présentées sur la **Figure 2**. Un effet significatif du groupe est observé, $F(3,74) = 12.47$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.34$. Quel que soit l'essai, les performances motrices manuelles du groupe d'adultes jeunes contrôles étaient significativement plus élevées que celles des autres groupes ($p < .001$ pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » et pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant » , $p = .05$ pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes âgés contrôles). Les deux groupes d'adultes jeunes portant le simulateur différaient significativement, en faveur du groupe sans contexte « menaçant » ($p = .05$). Les performances motrices manuelles des deux groupes d'adultes jeunes portant le simulateur étaient comparables à celles des adultes âgés ($p = .30$ pour le groupe 2 et $p = .32$ pour le groupe 3). Quel que soit le groupe, un effet significatif de l'essai est également observé en faveur du premier essai, et $F(1,74) = 24.38$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.25$. Par ailleurs, l'interaction entre le groupe et les essais était significative, $F(3,74) = 64.16$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.72$. Plus précisément, le nombre de pions placés était significativement moins important lors du deuxième essai comparativement au premier essai pour les deux groupes portant le simulateur de vieillissement ($\Delta_{\text{sans contexte « menaçant »}} = -6.96$ et $\Delta_{\text{avec contexte « menaçant »}} = -7.91$, $p < .001$ pour les deux contrastes). Le nombre de pions placés était significativement plus important au deuxième essai pour les autres groupes ($\Delta = 1.75$, $p = .02$ pour le groupe d'adultes jeunes contrôles et $\Delta = 1.20$, $p < .001$ pour le groupe d'adultes âgés contrôles). Ainsi, alors que les deux groupes d'adultes jeunes portant le simulateur ont diminué leurs performances motrices, les groupes contrôles d'adultes jeunes et âgés ont amélioré leurs performances motrices.

Au premier essai, le nombre de pions placés par le groupe d'adultes âgés était significativement moins élevé que les trois groupes d'adultes jeunes ($p < .001$ pour toutes les comparaisons). Les autres comparaisons étaient non significatives ($p > .26$ pour toutes les comparaisons).

Table 2. Moyennes (et écart-types) du niveau d'activité physique, du degré d'accord avec les stéréotypes, des performances motrices aux deux essais ainsi que des performances mnésiques pour chacune des catégories de verbes pour chacun des groupes expérimentaux

	Adultes jeunes contrôles		**Adultes jeunes avec simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant »**		**Adultes jeunes avec simulateur de vieillissement et contexte « menaçant »**		**Adultes âgés contrôles**	
Tâche motrice	**1er essai**	**2ème essai**	**1er essai**	**2ème essai (avec simulateur)**	**1er essai**	**2ème essai (avec simulateur)**	**1er essai**	**2ème essai**
Score global SPPB	11.10 (1.02)	11.30 (0.87)	11.27 (0.99)	11.09 (0.92)	10.95 (0.97)	10.52 (1.33)	10.80 (1.08)	10.88 (0.93)
Vitesse de marche (m/sec)	1.18 (0.16)	1.22 (0.13)	1.31 (0.18)	1.19 (0.21)	1.34 (0.18)	1.12 (0.23)	1.28 (0.35)	1.26 (0.22)
	Δ = 0.04 (0.09)		Δ = - 0.12 (0.13)		Δ = - 0.22 (0.20)		Δ = - 0.03 (0.24)	
Temps de lever de chaise (sec)	12.31 (2.56)	11.83 (2.65)	10.97 (3.32)	12.21 (2.34)	12.22 (2.67)	12.99 (2.84)	13.24 (3.39)	12.85 (3.24)
	Δ = 0.47 (1.04)		Δ = -1.24 (3.30)		Δ = - 0.78 (1.33)		Δ = 0.38 (1.19)	
Nombre de pions placés	26.65 (3.36)	28.40 (3.36)	27.50 (3.29)	20.55 (2.99)	26.14 (2.71)	18.24 (2.64)	22.12 (3.33)	23.32 (3.71)
	Δ = 1.75 (2.53)		Δ = - 6.96 (3.11)		Δ = - 7.91 (2.97)		Δ = 1.20 (2.18)	
Tâche de mémoire								
% de verbes d'action manuelle reconnu	83.07 (9.48)		85.38 (6.17)		78.28 (11.62)		76.94 (11.20)	
% de verbes d'action podale reconnu	83.72 (9.09)		82.91 (11.50)		80.49 (8.57)		78.08 (7.86)	
% de verbes de non-action reconnu	79.22 (9.4)		81.02 (14.00)		82.74 (12.36)		62.02 (16.43)	
Questionnaires								
Stéréotypes (maximum 56)	25.70 (5.40)		23.91 (4.66)		24.05 (4.70)		25.64 (4.94)	
Activité physique	177.11 (69.84) ; *n* = 18		168.83 (86.78) ; *n* = 18		149.13 (58.32) ; *n* = 20		173.52 (53.57) ; *n* = 23	

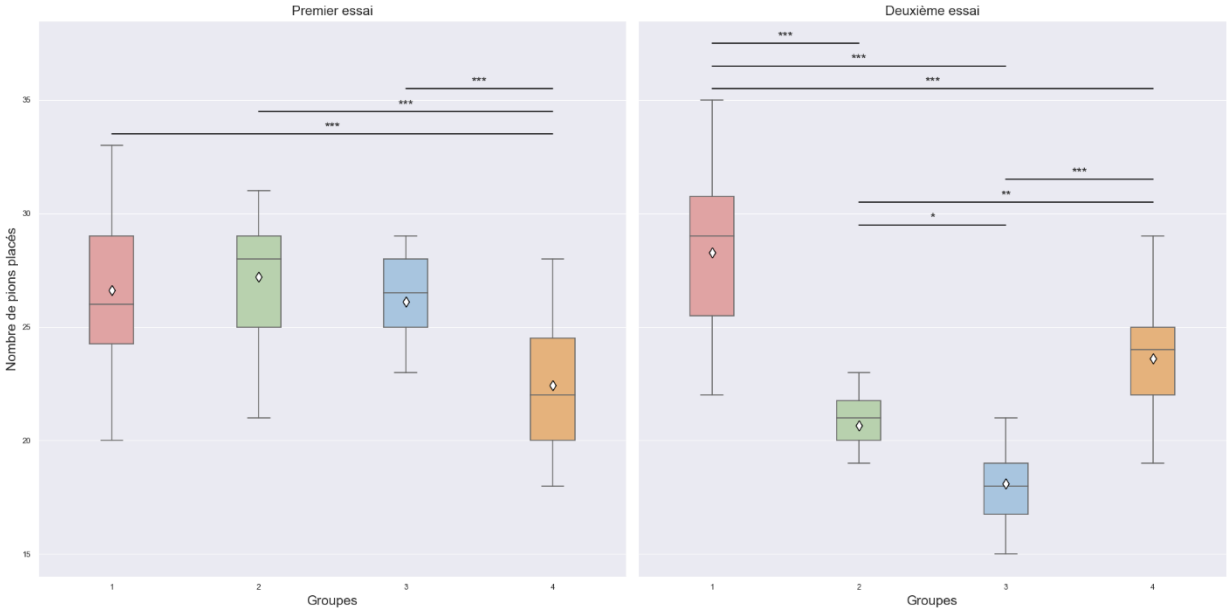


Figure 2. Nombre de pions placés pour chacun des groupes aux deux essais. 1 = adultes jeunes contrôles ; 2 = adultes jeunes simulateur sans contexte « menaçant » ; 3 = adultes jeunes simulateur avec contexte « menaçant » ; 4 = adultes âgés contrôles ; ◊ = moyenne ; * = $p < .05$; ** = $p < .01$; *** = $p < .001$

Autrement dit, lors du premier essai, le nombre de pions placés était comparable entre les trois groupes d'adultes jeunes.

Au second essai, le nombre de pions placés par le groupe d'adultes jeunes contrôles était significativement plus élevé que les deux groupes d'adultes jeunes portant le simulateur ($p < .001$ pour les deux comparaisons). L'effet de l'âge était toujours observé entre les adultes jeunes contrôles et âgés contrôles ($p < .001$). Le nombre de pions placés était moins élevé pour les groupes portant le simulateur de vieillissement que pour le groupe d'adultes âgés contrôles ($p = .004$ et $p < .001$ respectivement). Les deux groupes portant le simulateur différaient significativement ($p = .02$), le groupe sans contexte « menaçant » ayant placé plus de pions que celui avec contexte « menaçant ».

Enfin, la covariable niveau d'activité physique n'influençait pas significativement le nombre de pions placés selon le groupe, $F(1,74) = 0.14$, $p = .71$, peu importe l'essai, $F(1,74) = 2.51$, $p = .12$.

3.1.2. VITESSE DE MARCHE SUR QUATRE MÈTRES

Les moyennes des performances motrices aux deux essais pour chacun des groupes sont présentées sur la **Figure 3**. Aucun effet du groupe n'est observé sur la vitesse de marche, $F(3,74) = 0.51$, $p = .68$. Néanmoins, un effet significatif de l'essai est observé sur le temps de

marche, $F(1,74) = 4.37$, $p = .04$, $\eta^2_p = 0.06$, indiquant une vitesse de marche plus élevée lors du premier essai que du deuxième. L'effet de l'essai variait selon le groupe puisqu'une interaction significative est observée, $F(3,74) = 6.27$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.20$. La vitesse de marche diminue significativement entre les deux essais des groupes portant le simulateur de vieillissement ($\Delta = - 0.12$, $p = .01$ pour le groupe sans contexte « menaçant » et $\Delta = - 0.22$, $p < .001$ pour le groupe avec contexte « menaçant »). Pour les deux autres groupes, la vitesse de marche était comparable entre les deux essais ($\Delta = 0.04$, $p = .32$ pour les adultes jeunes contrôles et $\Delta = - 0.03$, $p = .44$ pour les adultes âgés contrôles).

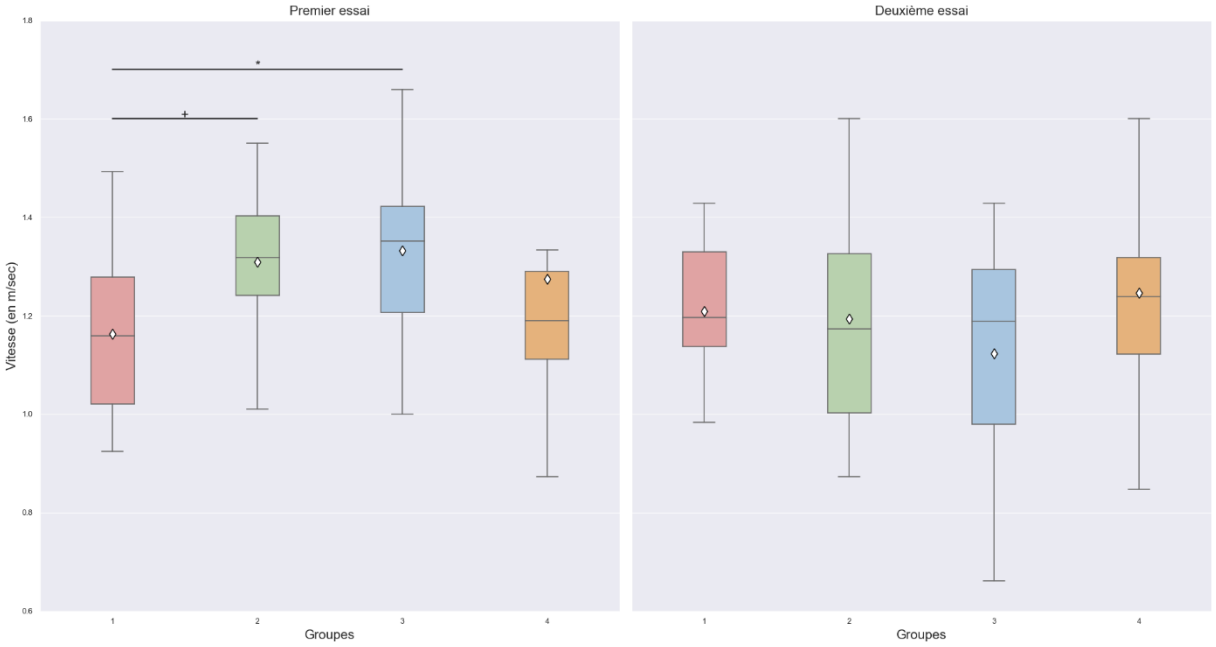


Figure 3. Vitesse de marche sur quatre mètres pour chacun des groupes aux deux essais. 1 = adultes jeunes contrôles ; 2 = adultes jeunes simulateur sans contexte « menaçant » ; 3 = adultes jeunes simulateur avec contexte « menaçant » ; 4 = adultes âgés contrôles ; ◊ = moyenne ; + = $p < .10$;* = $p < .05$

Au premier essai, aucun effet d'âge n'apparaissait sur cette mesure motrice : la vitesse de marche des adultes âgés était comparable à celle des trois groupes d'adultes jeunes ($p > .12$ pour toutes les comparaisons). Néanmoins, les adultes jeunes se distinguaient entre eux, bien qu'aucun ne porte le simulateur de vieillissement lors de ce premier essai. La vitesse de marche du groupe d'adulte jeunes contrôles était moins élevée que celle des groupes portant le simulateur de vieillissement ($p = .05$ pour le groupe sans contexte « menaçant » et $p = .02$ pour le groupe avec contexte « menaçant »). Les deux groupes portant le simulateur de vieillissement avaient, par ailleurs, une vitesse de marche comparable à ce premier essai ($p = .74$). Au second essai, aucune différence significative de vitesse de marche n'est observée entre les trois groupes d'adultes jeunes et d'adultes âgés contrôles ($p > .11$ pour toutes les comparaisons). Les groupes d'adultes jeunes ne se distinguaient pas entre eux ($p > .31$ pour toutes les comparaisons).

Le niveau d'activité physique n'influençait pas la vitesse de marche des participants jeunes ou âgés, $F(1,74) = 0.32$, $p = .57$, et ce, peu importe l'essai, $F(1,74) = 0.66$, $p = .42$.

3.1.3. TEMPS DE LEVER DE CHAISE

Les moyennes des performances motrices aux deux essais pour chacun des groupes sont présentées sur la **Figure 4**. L'ANOVA à mesures répétées n'a pas mis en évidence d'effet significatif du groupe ou des essais, $F(3,74) = 1.34$, $p = .27$ et $F(1,74) = 0.04$, $p = .84$ respectivement.

L'interaction groupe x essai était significative, $F(3,74) = 3.44$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.12$. Une augmentation significative du temps mis pour réaliser les levers de chaise est observée entre les deux essais pour le groupe d'adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » ($\Delta = -1.24$, $p = .007$), mais pas pour le groupe d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant » ($\Delta = -0.78$, $p = .08$). Les temps mis pour réaliser les levers de chaise ne variaient pas significativement pour les groupes d'adultes jeunes contrôles et d'adultes âgés contrôles entre les deux essais ($\Delta = 0.47$, $p = .36$ et $\Delta = 0.38$, $p = .45$ respectivement).

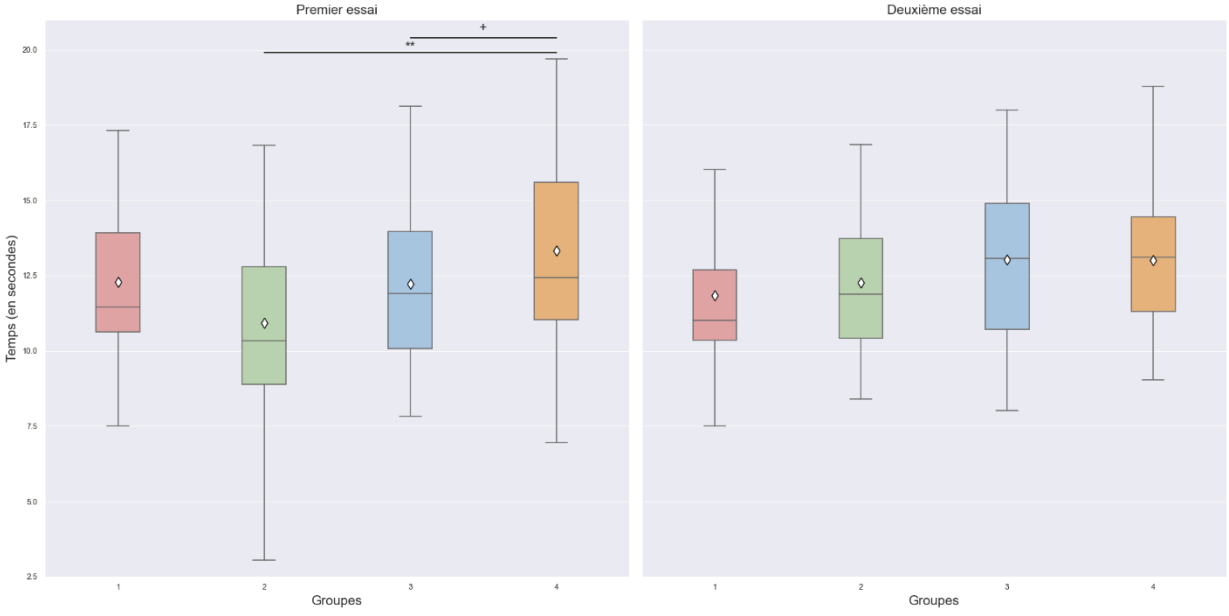


Figure 4. Temps mis pour réaliser les levers de chaise pour chacun des groupes aux deux essais. 1 = adultes jeunes contrôles ; 2 = adultes jeunes simulateur sans contexte « menaçant » ; 3 = adultes jeunes simulateur avec contexte « menaçant » ; 4 = adultes âgés contrôles ; ◊ = moyenne ; + = $p < .10$; ** = $p < .01$

Au premier essai, les temps de réalisation des levers de chaise ne différaient pas entre les trois groupes d'adultes jeunes ($p > .12$ pour toutes les comparaisons). Les adultes jeunes contrôles et âgés contrôles avaient un temps comparable pour les levers de chaise ($p = .28$). Néanmoins, les deux autres groupes d'adultes jeunes se distinguaient du groupe d'adultes âgés, en faveur

des adultes jeunes (p = .10 pour le groupe d'adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » et p = .007 pour le groupe d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant »). Pour rappel, lors de ce premier essai, les deux groupes portant le simulateur n'avaient pas encore le simulateur de vieillissement et l'activation des stéréotypes.

Au second essai, aucune différence significative n'était observée entre nos groupes (p > .22 pour toutes les comparaisons).

Pour cette mesure motrice, le niveau d'activité physique avait une influence négative significative sur les temps mis pour réaliser les levers de chaise, $F(1,74) = 10.64$, p = .002, $\eta^2_p = 0.13$, mais de façon équivalente selon les essais, $F(1,74) = 0.14$, p = .71 (corrélations de Pearson : r = - 0.31, p = .005 pour le premier essai et r = - 0.34, p = .002 pour le deuxième essai). En d'autres termes, les participants ayant une pratique d'activité physique plus importante étaient ceux pour qui les temps de lever de chaise sont les plus courts.

3.1.4. Les stéréotypes (mesurés par le FSA-14) expliquent-ils la diminution des performances motrices ?

Pour le groupe d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », les analyses de régression ont mis en évidence un lien négatif marginal entre les stéréotypes et les changements de performances motrices manuelles, β = - 0.42, $F(1,19) = 4.17$, p = .06, R^2 ajusté = 0.14. En d'autres termes, au sein du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », les participants ayant le plus de stéréotypes étaient ceux pour qui la diminution des performances motrices manuelles était la plus importante. Ce lien n'est pas retrouvé pour les changements de vitesse de marche ni pour les changements de temps de lever de chaise (p = .38 pour ces deux analyses).

Ces liens entre stéréotypes et performances motrices n'ont pas été observés au sein du groupe d'adultes jeunes sans contexte « menaçant », portant lui aussi le simulateur de vieillissement mais pour qui les stéréotypes n'ont pas été amorcés (p > .12 pour toutes les régressions linéaires). De la même façon, aucun lien entre stéréotypes négatifs et performances motrices n'apparaissait comme significatif au sein des groupes contrôles d'adultes jeunes (p > .20 pour toutes les régressions linéaires) et âgés (p > .33 pour toutes les régressions linéaires). Ainsi, contrairement au groupe d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », pour ces trois autres groupes, les stéréotypes négatifs ne prédisaient pas les changements de performances motrices manuelles entre les essais.

3.2. PERFORMANCES MNÉSIQUES

L'ANOVA à mesures répétées (quatre groupes x trois catégories de verbes) a mis en évidence un effet significatif du groupe, $F(3,83) = 7.00$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.20$, de la catégorie de verbes, $F(2,166) = 3.47$, $p = .03$, $\eta^2_p = 0.04$ et une interaction entre ces deux facteurs, $F(6,166) = 6.42$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.19$. Le niveau de vocabulaire n'influençait pas les performances mnésiques, $F(1,83) = 0.13$, $p = .72$, peu importe la catégorie de verbes, $F(2,166) = 2.19$, $p = .12$.

Plus précisément, les analyses de contrastes réalisées afin de décrire l'effet du groupe indiquent que le groupe d'adultes âgés a obtenu des performances de mémoire significativement plus faibles que les trois groupes d'adultes jeunes ($p < .001$ pour les adultes jeunes contrôles et portant le simulateur sans contexte « menaçant » et $p = .002$ pour les adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant »). Aucune différence significative n'est observée entre les performances mnésiques des trois groupes d'adultes jeunes ($p > .33$). Concernant l'effet de la catégorie de verbes, seuls les verbes de non-action se différenciaient significativement des verbes d'action manuelle et podale ($p < .001$), dans le sens où les verbes de non-action ont été moins bien reconnus que les autres, quel que soit le groupe. Aucune différence n'est observée entre les verbes d'action manuelle et podale ($p = .74$).

Enfin, l'interaction significative indique que l'effet du groupe n'était pas le même selon la catégorie du verbe reconnu. La **Figure 5**, présentant les performances moyennes pour chaque groupe expérimental en fonction de la catégorie des verbes, illustre cette interaction.

Concernant les **verbes d'action manuelle**, aucune différence significative n'a été retrouvée entre les groupes d'adultes jeunes contrôles et d'adultes jeunes portant le simulateur avec ($p = .21$) ou sans contexte « menaçant » ($p = .36$). Néanmoins, les performances du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » étaient significativement plus élevées que celles du groupe avec contexte « menaçant » ($p = .02$). Enfin, les performances des adultes âgés ne différaient pas du groupe d'adultes jeunes contrôles ($p = .29$). Les adultes âgés différaient également significativement du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » ($p = .03$). Aucune différence significative n'est retrouvée entre les groupes d'adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant » et d'adultes âgés ($p = .95$).

Concernant les **verbes d'action podale**, aucune différence significative n'apparaissait entre les performances des groupes d'adultes jeunes et âgés contrôles ($p = .11$ pour les adultes jeunes contrôles, $p = .13$ pour adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant » et

p = .43 pour adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant »). Aucune différence significative n'est observée entre les trois groupes d'adultes jeunes (*p* = .76 pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *p* = .33 pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant » et *p* = .51 pour les deux groupes portant le simulateur de vieillissement).

Enfin, concernant les **verbes de non-action**, seul le groupe d'adultes âgés a obtenu des performances mnésiques significativement moins élevées que les trois groupes d'adultes jeunes (*p* < .001 pour chacune des comparaisons). Les trois groupes d'adultes jeunes ont obtenu des performances comparables quant aux verbes de non-action (*p* = .90 pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *p* = .41 pour adultes jeunes contrôles *vs.* adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant » et *p* = .47 pour les deux groupes portant le simulateur de vieillissement).

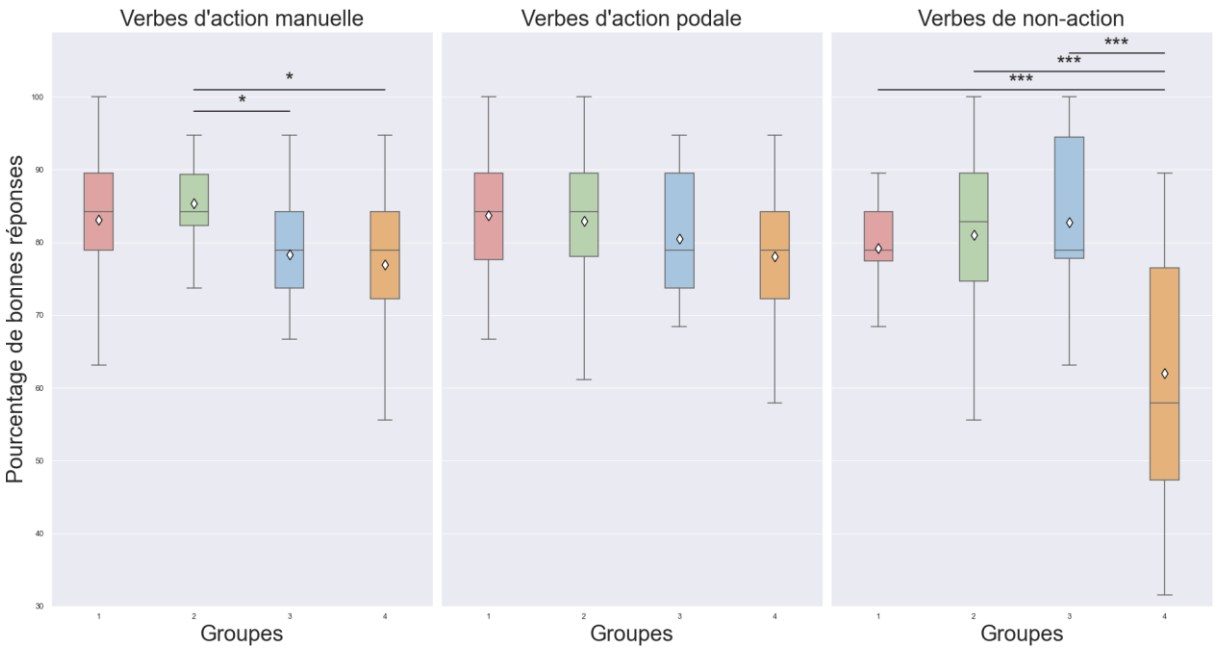


Figure 5. Pourcentage de bonnes réponses pour les verbes d'action manuelle, podale et de non-action, pour chaque groupe expérimental. 1 = adultes jeunes contrôles ; 2 = adultes jeunes simulateur sans contexte « menaçant » ; 3 = adultes jeunes simulateur avec contexte « menaçant » ; 4 = adultes âgés contrôles ; ◊ = moyenne ; * = *p* < .05 ; *** = *p* < .001.

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'explorer les effets d'une situation de vieillissement physique fictif et d'un contexte psychosocial pouvant être « menaçant » sur les performances mnésiques d'adultes jeunes. Cette étude est la première à évaluer la mémoire des verbes d'action, dans une situation de vieillissement fictif tout en considérant l'influence de l'environnement social. Les

résultats de l'étude actuelle soutiennent partiellement l'approche incarnée et située de la mémoire. Dans un premier temps, les résultats confirment que le simulateur de vieillissement diminue les performances motrices des adultes jeunes sur les différentes tâches. En effet, pour chacune d'elles, les performances motrices des groupes portant le simulateur de vieillissement sont affectées lorsque celui-ci est porté. Ces résultats sont cohérents avec les études indiquant un effet du simulateur sur les performances motrices (Gaggioli et al., 2018; Lauenroth et al., 2017; Laurentius et al., 2022; Lavallière et al., 2017; Moutoussamy et al., soumis; Schaefer et al., 2022; Vieweg & Schaefer, 2020; Zijlstra et al., 2016). La diminution des performances motrices, particulièrement manuelles, liée au simulateur de vieillissement est accentuée lorsque les stéréotypes sur le vieillissement sont activés, appuyant l'existence d'un lien entre environnement social et performance motrice chez les adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement (Moutoussamy et al., soumis, Étude 3). Ce résultat est particulièrement important puisqu'il indique que la diminution des performances motrices liée au simulateur de vieillissement peut ne pas être uniquement expliquée par des entraves motrices, mais également par les représentations sur le vieillissement.

Contrairement à nos attentes, les performances mnésiques des adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement sans contexte « menaçant » ne différaient pas de celles des adultes jeunes contrôles. Le simulateur de vieillissement seul n'a donc pas modifié les performances mnésiques des adultes jeunes. A l'inverse des études indiquant qu'une perturbation motrice altère les traces mnésiques (Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Villatte et al., 2021), ces premiers résultats ne nous permettent pas de confirmer que de moins bonnes capacités motrices sont associées à des traces mnésiques de moins bonne qualité. Des explications méthodologiques comme théoriques peuvent être considérées. Les études portant sur des modifications de processus cognitifs sur des concepts d'action utilisent des paradigmes de perturbation motrice dans lesquels les membres sont totalement immobilisés durant 24 heures (Villatte et al., 2021) ou non disponibles (Dutriaux & Gyselinck, 2016b). Dans notre cas, lorsque le simulateur est porté, les membres sont moins disponibles et ne sont pas totalement immobilisés ou indisponibles. Seul un ralentissement et/ou des modifications motrices sont induits. Ainsi, ces modifications sur une durée courte (40 minutes) peuvent ne pas suffire à modifier les performances mnésiques associées aux concepts d'action. La question subsiste encore pour des durées de port du simulateur plus longue.

Au sein de l'approche incarnée et située de la cognition, la diminution des performances mnésiques au cours du vieillissement est expliquée par la qualité de la trace mnésique (Mille et

al., 2021; Vallet, 2015). Vallet et al. (2017) précisent que les erreurs les plus souvent commises par les adultes âgés sont des erreurs nécessitant de rejeter un distracteur proche d'un point de vue perceptif de l'item cible. Ainsi, la distinctivité entre les items présentés peut-être une piste de recherche intéressante afin d'évaluer la qualité de la trace dans de futures études. De plus, la tâche de mémoire actuelle implique des verbes d'action et de non-action, qui diffèrent en termes de concrétude et d'imageabilité. Ces différences peuvent alors favoriser la mémorisation des verbes d'action comparativement aux verbes de non-action, notamment chez les adultes âgés. Une solution possible afin de pallier cette limite à l'avenir serait d'utiliser des objets manipulables comparativement à des objets non manipulables, pour lesquels la concrétude et l'imageabilité pourraient être plus aisément équivalentes. Néanmoins, la catégorie « objets manipulables » permet moins de distinguer ce qui implique de la motricité manuelle et podale, contrairement aux verbes d'action.

Enfin, nous ne pouvons pas écarter le fait que les traces mnésiques ne reposeraient pas uniquement sur les aspects sensorimoteurs, et donc ne seraient pas incarnées, puisque celles-ci ne sont pas affectées par une modification motrice. Néanmoins, l'étude actuelle présente des résultats novateurs quant aux effets conjoints de la motricité et l'environnement sur la mémoire, pouvant soutenir et être interprétés selon l'approche incarnée et située. En effet, la présente étude suggère que l'interaction entre la diminution de la motricité et l'environnement social est particulièrement importante pour l'émergence de certaines traces mnésiques. Lorsque la notion de vieillissement est ajoutée par le contexte psychosocial « menaçant », les effets du simulateur sur les performances mnésiques des verbes d'action manuelle s'accentuent. En effet, les performances du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur dans un contexte « menaçant » sont plus faibles que celles du groupe sans contexte « menaçant », bien qu'elles ne se distinguent pas de celles des adultes jeunes contrôles. Un manque de puissance observé dans les données peut expliquer ce dernier résultat.

Selon une approche incarnée et située, ces résultats pourraient être interprétés par des performances mnésiques dépendant en partie des capacités motrices associées à l'environnement social « menaçant ». En ce sens, il semble cohérent que les performances mnésiques des verbes d'action podale ne se distinguent pas significativement entre nos groupes expérimentaux. En effet, bien que le simulateur ait diminué les performances motrices podales, celles-ci n'ont pas été plus affectées par l'activation des stéréotypes. Ainsi, la diminution de performances mnésiques chez les adultes jeunes portant le simulateur dans un contexte « menaçant » ne s'observe que pour les verbes d'action manuelle, donc associée à une partie du

corps dont les capacités motrices ont été significativement plus altérées par le simulateur de vieillissement avec contexte « menaçant » que sans contexte « menaçant ». Par ailleurs, en ce qui concerne les verbes de non-action, le simulateur seul comme associé à un environnement psychosocial « menaçant » n'influence pas les performances mnésiques.

Pour compléter ces résultats, il serait intéressant d'inclure une condition « contrôle » supplémentaire, dans laquelle les adultes jeunes ne portent pas de simulateur de vieillissement mais ont une activation des stéréotypes. Il serait possible de confirmer que l'effet observé n'est pas simplement dû à l'activation des stéréotypes sur le vieillissement mais bien à une interaction entre le contexte menaçant et la diminution de la motricité. De la même façon, le nom donné au simulateur de vieillissement dans la condition sans contexte « menaçant » pourrait également amener des modifications motrices artificielles, suggérées par la présentation du dispositif. Les termes « combinaison modifiant la motricité » pourraient menacer différemment les performances des adultes jeunes. Ainsi, les futures études pourront investiguer les effets du simulateur de vieillissement sur les performances mnésiques en utilisant différents termes, représentant des conditions favorables (par ex. combinaison de challenge), neutres (par ex. maintien de la posture) ou défavorables (par ex. affecter la motricité, vieillissement).

Une fois les liens entre mémoire, motricité et environnement social bien identifiés, de futures études devront approfondir la compréhension des effets du simulateur sur les performances mnésiques des adultes jeunes placés dans un contexte psychosocial « menaçant » en identifiant des mécanismes explicatifs sous-jacents.

Dans un premier temps, de la même façon que la diminution des performances motrices du groupe d'adultes jeunes portant le simulateur de vieillissement placés dans un contexte psychosocial « menaçant » est expliquée par les stéréotypes négatifs, nous pouvons supposer qu'une diminution des performances mnésiques s'expliquerait par les stéréotypes négatifs. En d'autres termes, plus une personne portant le simulateur de vieillissement dans un contexte « menaçant » aurait de stéréotypes négatifs quant aux adultes âgés et moins ses performances mnésiques seraient élevées. Pour cela, une estimation de la diminution des performances mnésiques consécutive au port du simulateur de vieillissement dans un contexte « menaçant » pourrait être réalisée à partir d'une tâche mnésique, réalisée à deux reprises (une sans et une avec simulateur de vieillissement). Par ailleurs, l'étude de Beaudoin et al. (2020) appuie ces propos sur une tâche cognitive. Dans cette étude, plus un participant a de représentations

négatives sur l'activité motrice des adultes âgés et plus l'effet délétère de l'avatar « âgé » sur la performance d'imagerie motrice était important.

Par ailleurs, pour les groupes d'adultes jeunes portant le simulateur, le ressenti individuel pourrait aussi jouer un rôle dans les performances motrices et mnésiques. Ainsi, tout comme Reinhard et al. (2020) ont montré que l'effet Proteus était plus marqué chez les participants ayant un fort sentiment d'appartenir à l'environnement virtuel, il serait important d'évaluer le « sentiment d'appartenance » lié au simulateur de vieillissement. Autrement dit, la façon avec laquelle une personne s'approprie les caractéristiques physiques du simulateur de vieillissement pourrait influencer la force des effets du simulateur sur les performances motrices et mnésiques.

Enfin, bien que différent de l'effet Proteus, pour lequel le vieillissement fictif est induit par réalité virtuelle, l'utilisation des simulateurs de vieillissement permet également un vieillissement fictif et brutal. Ainsi, les mécanismes sous-jacents à l'effet Proteus seraient également à investiguer pour expliquer les diminutions de performances motrices et mnésiques, particulièrement dans le groupe pour lequel le contexte précise le vieillissement. Ces mécanismes sont peu étudiés à l'heure actuelle mais incluent la déduction puis l'assimilation à des indices identitaires et visuels de l'avatar et/ou l'amorçage puis l'activation de schémas préexistants en mémoire en lien avec les caractéristiques de l'avatar (Peña, 2020).

Pour conclure, la présente étude est la première à explorer les liens entre mémoire des concepts d'action en influençant à la fois la motricité et l'environnement social. Bien que cette étude présente des limites méthodologiques, celle-ci encourage l'étude de l'interaction entre motricité et environnement sur les performances mnésiques. Les résultats présentés permettent d'élaborer une approche et une méthodologie plus précises afin d'investiguer ces liens dans de futures études. Les mécanismes explicatifs suggérés peuvent également être des pistes d'intérêt pour de plus vastes recherches afin d'améliorer la compréhension des effets simultanés de la motricité et de l'environnement social sur la mémoire. Enfin, cette étude a cherché à comprendre le vieillissement de la mémoire des concepts d'action en s'intéressant aux adultes jeunes, pour qui la motricité et l'environnement social ont pu être modifiés expérimentalement. Il serait important d'investiguer ces liens différemment auprès des adultes âgés eux-mêmes, et ce, en isolant au mieux les effets de l'âge liés à des difficultés exécutives de ceux liés à des changements moteurs.

Références

1. Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz, A. M., Strath, S. J., O'Brien, W. L., Bassett, D. R., Schmitz, K. H., Emplaincourt, P. O., Jacobs, D. R., & Leon, A. S. (2000). Compendium of Physical Activities : An update of activity codes and MET intensities: Medicine & Science in Sports & Exercise, 32(Supplement), S498-S516. https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009

2. Armstrong, B., Gallant, S. N., Li, L., Patel, K., & Wong, B. I. (2017). Stereotype Threat Effects on Older Adults' Episodic and Working Memory : A Meta-Analysis. The Gerontologist, 57(suppl_2), S193-S205. https://doi.org/10.1093/geront/gnx056

3. Barber, S. J., Hamel, K., Ketcham, C., Lui, K., & Taylor-Ketcham, N. (2020). The effects of stereotype threat on older adults' walking performance as a function of task difficulty and resource evaluations. Psychology and Aging, 35(2), 250-266. https://doi.org/10.1037/pag0000440

4. Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. Annual Review of Psychology, 59(1), 617-645. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639

5. Beaudoin, M., Barra, J., Dupraz, L., Mollier-Sabet, P., & Guerraz, M. (2020). The impact of embodying an "elderly" body avatar on motor imagery. Experimental Brain Research, 238(6), 1467-1478. https://doi.org/10.1007/s00221-020-05828-5

6. Bouazzaoui, B., Fay, S., Guerrero-Sastoque, L., Semaine, M., Isingrini, M., & Taconnat, L. (2020). Memory Age-based Stereotype Threat : Role of Locus of Control and Anxiety. Experimental Aging Research, 46(1), 39-51. https://doi.org/10.1080/0361073X.2019.1693009

7. Bouazzaoui, B., Follenfant, A., Ric, F., Fay, S., Croizet, J.-C., Atzeni, T., & Taconnat, L. (2016). Ageing-related stereotypes in memory : When the beliefs come true. Memory, 24(5), 659-668. https://doi.org/10.1080/09658211.2015.1040802

8. Boudjemad, V., & Gana, K. (2009). L'âgisme : Adaptation française d'une mesure et test d'un modèle structural des effets de l'empathie, l'orientation à la dominance sociale et le dogmatisme sur l'âgisme. Canadian Journal on Aging / La Revue canadienne du vieillissement, 28, 371-389. https://doi.org/10.1017/S071498080999016X

9. Boutet, I., Dawod, K., Chiasson, F., Brown, O., & Collin, C. (2019). Perceptual Similarity Can Drive Age-Related Elevation of False Recognition. Frontiers in Psychology, 10. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.00743

10. Chiviacowsky, S., Cardozo, P. L., & Chalabaev, A. (2018). Age stereotypes' effects on motor learning in older adults : The impact may not be immediate, but instead delayed. Psychology of Sport and Exercise, 36, 209-212. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.02.012

11. Costello, M. C., & Bloesch, E. K. (2017). Are Older Adults Less Embodied? A Review of Age Effects through the Lens of Embodied Cognition. Frontiers in Psychology, 8. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00267

12. Deltour, J. (1993). Echelle de vocabulaire du Mill Hill de J.C. Raven. Adaptation françaises et normes comparées du Mill Hill et du Progressive Matrice (PM38).

13. de Vega, M., Dutriaux, L., Moreno, I. Z., García-Marco, E., Seigneuric, A., & Gyselinck, V. (2021). Crossing hands behind your back reduces recall of manual action sentences and alters brain dynamics. Cortex, 140, 51-65. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.03.016

14. Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. Cognition, 102(1), 139-149. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009

15. Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016). Learning Is Better with the Hands Free : The Role of Posture in the Memory of Manipulable Objects. PLOS ONE, 11(7), e0159108. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159108

16. Dutriaux, L., Nicolas, S., & Gyselinck, V. (2021). Aging and posture in the memory of manipulable objects. Aging, Neuropsychology, and Cognition, 28(1), 26-36. https://doi.org/10.1080/13825585.2019.1708252

17. Eich, T. S., Murayama, K., Castel, A. D., & Knowlton, B. J. (2014). The dynamic effects of age-related stereotype threat on explicit and implicit memory performance in older adults. Social Cognition, 32, 559-570. https://doi.org/10.1521/soco.2014.32.6.559

18. Frison, A.-K., Aigner, L., Wintersberger, P., & Riener, A. (2018). Who is Generation A? : Investigating the Experience of Automated Driving for Different Age Groups. Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 94-104. https://doi.org/10.1145/3239060.3239087

19. Gaggioli, A., Settimi, C., Cipresso, P., Pedroli, E., Stramba-Badiale, M., & Riva, G. (2018). Using an Aging Simulator Suit for Modeling Visuo-Motor Limitations of Elderly Users Interacting with a Mobile Application : Feasibility Study. In P. Cipresso, S. Serino, Y. Ostrovsky, & J. T. Baker (Éds.), Pervasive Computing Paradigms for Mental Health (Vol. 253, p. 24-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01093-5_4

20. Ginsberg, F. (2012). Les effets automatiques de l'activation du stéréotype associé aux personnes en situation de handicap sur les performances de motricité fine. [Thèse de Doctorat, Université de Starsbourg]

21. Grégoire, C., Villatte, J., Taconnat, L., & Majerus, S. (2023). A database distinguishing concreteness, imageability and emotional valence values for nouns and verbs in French. https://osf.io/453ft/

22. Guralnik, J. M., Simonsick, E. M., Ferrucci, L., Glynn, R. J., Berkman, L. F., Blazer, D. G., Scherr, P. A., & Wallace, R. B. (1994). A short physical performance battery assessing lower extremity function : Association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. Journal of Gerontology, 49(2), M85-94. https://doi.org/10.1093/geronj/49.2.m85

23. Hamilton, L. D., Thomas, E., Almuklass, A. M., & Enoka, R. M. (2017). A framework for identifying the adaptations responsible for differences in pegboard times between middle-aged and older adults. Experimental gerontology, 97, 9-16. https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.07.003

24. Hummert, M. L. (2011). Chapter 16—Age Stereotypes and Aging. In K. W. Schaie & S. L. Willis (Éds.), Handbook of the Psychology of Aging (Seventh Edition) (p. 249-262). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380882-0.00016-4

25. Körner, A., Topolinski, S., & Strack, F. (2015). Routes to embodiment. Frontiers in Psychology, 6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00940

26. Lauenroth, A., Schulze, S., Ioannidis, A., Simm, A., & Schwesig, R. (2017). Effect of an Age Simulation Suit on Younger Adults' Gait Performance Compared to Older Adults' Normal Gait. Research in Gerontological Nursing, 10(5), 227-233. https://doi.org/10.3928/19404921-20170831-04

27. Laurentius, T., Quandel, J., Bollheimer, L. C., Leonhardt, S., Ngo, C., & Lüken, M. (2022). Spatiotemporal gait parameters in young individuals wearing an age simulation suit compared to healthy older individuals. European Review of Aging and Physical Activity, 19(1), 29. https://doi.org/10.1186/s11556-022-00298-w

28. Lavallière, M., D'Ambrosio, L., Gennis, A., Burstein, A., Godfrey, K. M., Waerstad, H., Puleo, R. M., Lauenroth, A., & Coughlin, J. F. (2017). Walking a mile in another's shoes : The impact of wearing an Age Suit. Gerontology & Geriatrics Education, 38(2), 171-187. https://doi.org/10.1080/02701960.2015.1079706

29. Loggia, G., Pellichero, A., Moutoussamy, I., Morello, R., Pothier, K., & Chavoix, C. (2023). The PAPA Questionnaire : Assessment of Long-Term Engagement in Activities, with Separate Quantification of Their Physical, Cognitive, and Social Components. Clinical Interventions in Aging, Volume 18, 327-341. https://doi.org/10.2147/CIA.S377917

30. Mazerolle, M., Régner, I., Morisset, P., Rigalleau, F., & Huguet, P. (2012). Stereotype threat strengthens automatic recall and undermines controlled processes in older adults. Psychological Science, 23(7), 723-727. https://doi.org/10.1177/0956797612437607

31. Mazerolle, M., Régner, I., Rigalleau, F., & Huguet, P. (2015). Stereotype Threat Alters the Subjective Experience of Memory. Experimental Psychology, 62(6), 395-402. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000303

32. Mille, J., Brambati, S. M., Izaute, M., & Vallet, G. T. (2021). Low-Resolution Neurocognitive Aging and Cognition : An Embodied Perspective. Frontiers in Systems Neuroscience, 15, 687393. https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.687393

33. Mille, J., Izaute, M., & Vallet, G. T. (2023). Liens entre le déclin sensoriel et cognitif dans le vieillissement normal : Revue critique de la littérature et apports de l'approche incarnée et située de la cognition. Psychologie Française, 68(1), 71-90. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2022.06.001

34. Moutoussamy, I., Taconnat, L., Villatte, J., Toussaint, L., Pothier, K. (sous presse). Etudier le vieillissement mnésique d'un point de vue incarné : réflexions théoriques sur l'apport des simulateurs de vieillissement. L'Année Psychologique

35. Moutoussamy, I., Pothier, K., Toussaint, L., Keroum, S., & Laurence Taconnat (soumis). The impact of mentioning aging on motor performance of younger adults wearing an aging suit. Experimental Aging Research

36. Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA : A brief screening tool for mild cognitive impairment. Journal of the American Geriatrics Society, 53(4), 695-699. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x

37. Peña, J. (2020). Proteus Effect. In The International Encyclopedia of Media Psychology (p. 1-7). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119011071.iemp0225

38. Reinhard, R., Shah, K. G., Faust-Christmann, C. A., & Lachmann, T. (2020). Acting your avatar's age : Effects of virtual reality avatar embodiment on real life walking speed. Media Psychology, 23(2), 293-315. https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1598435

39. Roth, W.-M., & Jornet, A. (2013). Situated cognition : Situated cognition. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, 4(5), 463-478. https://doi.org/10.1002/wcs.1242

40. Sari, D., Taskiran, N., Baysal, E., Acar, E., & Cevik Akyil, R. (2020). Effect of an aged simulation suit on nursing students' attitudes and empathy. European Geriatric Medicine, 11(4), 667-675. https://doi.org/10.1007/s41999-020-00316-z

41. Schaefer, S., Bill, D., Hoor, M., & Vieweg, J. (2022). The influence of age and age simulation on task-difficulty choices in motor tasks. Aging, Neuropsychology, and Cognition, 1-26. https://doi.org/10.1080/13825585.2022.2043232

42. Steele, C. M. (1997). A threat in the air. How stereotypes shape intellectual identity and performance. The American Psychologist, 52(6), 613-629. https://doi.org/10.1037//0003-066x.52.6.613

43. Steele, C. M., & Aronson, J. (1995). Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans. Journal of Personality and Social Psychology, 69, 797-811. https://doi.org/10.1037/0022-3514.69.5.797

44. Swift, H. J., Lamont, R. A., & Abrams, D. (2012). Are they half as strong as they used to be? An experiment testing whether age-related social comparisons impair older people's hand grip strength and persistence. BMJ Open, 2(3), e001064. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001064

45. Taconnat, L., & Lemaire, P. (2014). Fonctions exécutives, vieillissement cognitif et variations stratégiques [Executive functions, cognitive aging and strategic variations]. Psychologie Française, 59(1), 89–100. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2013.03.007

46. Vallet, G. T. (2015). Embodied cognition of aging. Frontiers in Psychology, 6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00463

47. Vallet, G. T., Hudon, C., Bier, N., Macoir, J., Versace, R., & Simard, M. (2017). A SEMantic and EPisodic Memory Test (SEMEP) Developed within the Embodied Cognition Framework : Application to Normal Aging, Alzheimer's Disease and Semantic Dementia. Frontiers in Psychology, 8, 1493. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01493

48. Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). Cognition incarnée : Une cognition située et projetée (Mardaga).

49. Vieweg, J., Panzer, S., & Schaefer, S. (2023). Effects of age simulation and age on motor sequence learning : Interaction of age-related cognitive and motor decline. Human Movement Science, 87, 103025. https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.103025

50. Vieweg, J., & Schaefer, S. (2020). How an Age Simulation Suit affects Motor and Cognitive Performance and Self-perception in Younger Adults. Experimental Aging Research, 46(4), 273-290. https://doi.org/10.1080/0361073X.2020.1766299

51. Villatte, J., Taconnat, L., Bidet-Ildei, C., & Toussaint, L. (2021). Short-term upper limb immobilization and the embodied view of memory : A pilot study. PLOS ONE, 16(3), e0248239. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248239

52. Wechsler, D. (1945). Wechsler memory scale. Psychological Corporation.

53. West, R. (1996). An Application of Prefrontal Cortex Function Theory to Cognitive Aging. Psychological Bulletin, 120(2), 272-292. https://doi.org/10.1037/0033-2909.120.2.272

54. West, R. (2000). In defense of the frontal lobe hypothesis of cognitive aging. Journal of the International Neuropsychological Society, 6(6), 727-729. https://doi.org/10.1017/s1355617700666109

55. Yoo, S.-C., Peña, J. F., & Drumwright, M. E. (2015). Virtual shopping and unconscious persuasion : The priming effects of avatar age and consumers' age discrimination on purchasing and prosocial behaviors. Computers in Human Behavior, 48, 62-71. https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.01.042

56. Zigmond, A. S., & Snaith, R. P. (1983). The Hospital Anxiety and Depression Scale. Acta Psychiatrica Scandinavica, 67(6), 361-370. https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x

57. Zijlstra, E., Hagedoorn, M., Krijnen, W. P., van der Schans, C. P., & Mobach, M. P. (2016). Route complexity and simulated physical ageing negatively influence wayfinding. Applied Ergonomics, 56, 62-67. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.03.009

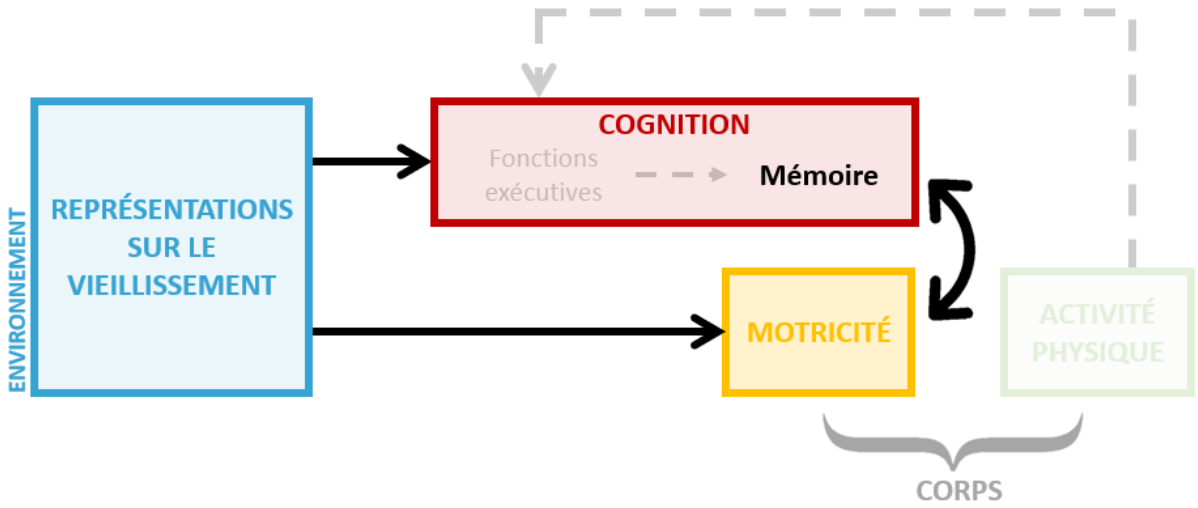
Points importants – Études 3 & 4

- **Des changements moteurs liés au simulateur de vieillissement**

Les performances motrices d'adultes jeunes placés en situation de vieillissement fictif sont influencées par les représentations sur le vieillissement (Études 3 et 4).

- **Des changements mnésiques liés au simulateur de vieillissement**

Les changements moteurs associés à une activation des stéréotypes modifieraient les performances mnésiques de verbes impliquant certaines actions (Étude 4).



Discussion générale

Ce travail de thèse visait à étudier l'implication du corps et de l'environnement social dans les processus mnésiques, à l'aide de deux méthodes utilisant des appuis théoriques et méthodologiques issus des courants cognitivistes (étude du lien entre activité physique et mémoire) mais aussi d'une approche incarnée et située de la cognition (étude du lien entre motricité, environnement et mémoire). Les études menées indiquent que le corps est impliqué dans le fonctionnement de la mémoire, bien que les effets de l'activité physique et la motricité seraient basés sur des modes d'action différents. L'activité physique serait un facteur protecteur des effets de l'âge sur la mémoire par le biais d'un bénéfice sur les fonctions exécutives. La motricité serait, en fonction de l'environnement, un élément constitutif des traces mnésiques elles-mêmes. Ainsi, l'implication du corps et de l'environnement social pourrait être retrouvée tant sur les processus soutenant la mémoire (fonctions exécutives) que sur la qualité de la trace mnésique elle-même. Plus généralement, les résultats des études réalisées peuvent être décrits au regard des capacités intrinsèques et de l'environnement tels que présentés par l'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization, 2015). En effet, les capacités intrinsèques (cognitives, sensorimotrices, psychologiques) s'influenceraient mutuellement mais seraient également associées à l'environnement dans lequel elles se manifestent. Les aptitudes fonctionnelles représentent alors la conjonction entre les capacités intrinsèques de l'individu, les caractéristiques pertinentes de l'environnement, et les interactions entre l'individu et ces caractéristiques (**Figure 1**, World Health Organization, 2015).

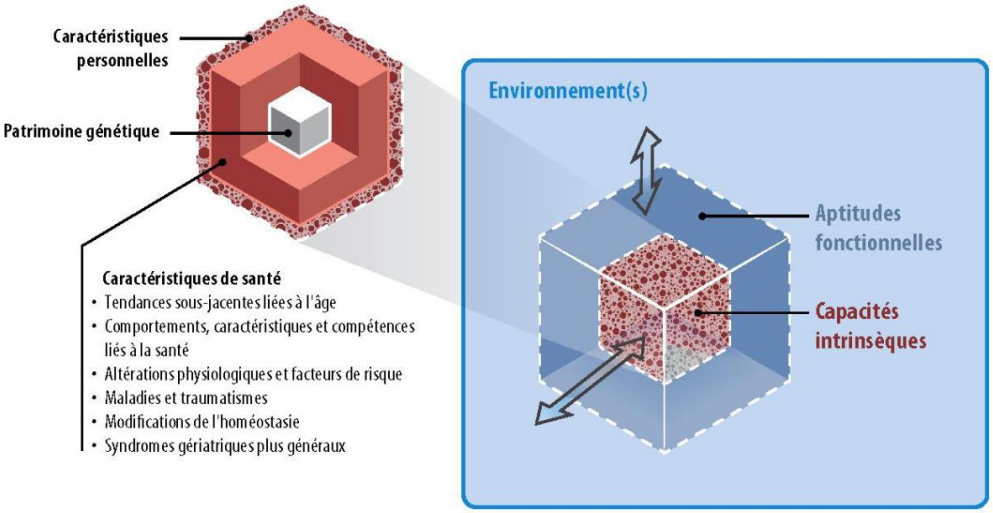


Figure 1. Liens entre capacités intrinsèques, aptitudes fonctionnelles et environnement(s) (World Health Organization, 2015)

La discussion générale s'articule autour de deux parties. La première partie discute de l'implication du corps dans le fonctionnement mnésique au travers de l'activité physique et de la motricité. La seconde partie apporte des pistes de réflexion quant à la prise en compte des liens

plus complexes existant entre mémoire, motricité et environnement. Un modèle plus holistique de l'implication du corps et de l'environnement dans les processus mnésiques sera proposé.

1. IMPLICATION DU CORPS À DIFFÉRENTS NIVEAUX DU FONCTIONNEMENT MNÉSIQUE

1.1. L'IMPLICATION DU CORPS VIA L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Le premier axe de recherche (Études 1 et 2) confirme l'effet protecteur de l'activité physique sur les performances exécutives (par ex. Boucard et al., 2012; Dai et al., 2013; Gajewski & Falkenstein, 2015; Hillman et al., 2006; Huang et al., 2014; Ingold et al., 2020; Netz et al., 2011; Voelcker-Rehage et al., 2010; Wilbur et al., 2012) et mnésiques (par ex. Bullock et al., 2018; Bunce & Murden, 2006; Chan et al., 2005; de Lima et al., 2019; Flöel et al., 2010; Hamer et al., 2018; Hayes et al., 2015; Kachouri et al., 2022; Kovacevic et al., 2020) lors de l'avancée en âge. Dans ces deux études et en cohérence avec la littérature, l'âge peut être considéré comme un modérateur du lien entre l'activité physique et la cognition (Colcombe & Kramer, 2003; Etnier et al., 1997; Gajewski et al., 2023). En effet, que ce soit pour les performances exécutives ou mnésiques, les liens entre ces performances cognitives et l'activité physique ne sont significatifs que chez les adultes âgés.

Dans les Études 1 et 2, l'activité physique était un prédicteur significatif des performances mnésiques. Le fonctionnement exécutif (Étude 1) et l'âge (Étude 2) n'expliquaient plus les performances mnésiques lorsque l'activité physique était contrôlée dans les analyses. Ainsi, les adultes âgés avec un haut niveau d'activité physique auraient de meilleures performances exécutives, expliquant les meilleures performances mnésiques lors de tâches ne fournissant aucun support environnemental (voir Étude 1, Moutoussamy et al., 2022) ou lors de tâches mnésiques coûteuses en ressources exécutives (voir Étude 2, Moutoussamy et al., en révision). Ces résultats confirment les propos avancés par Hall et al. (2001) indiquant que les bénéfices de l'activité physique seraient plus importants sur les tâches nécessitant des ressources exécutives puisque les changements cognitifs liés à l'âge sont en lien avec une diminution des ressources exécutives. En effet, les changements mnésiques observés chez les adultes âgés s'expliquent, en partie, par une diminution des performances aux tâches exécutives (West, 1996, 2000). Les fonctions exécutives, entre autres, facilitent la mise en place de stratégies auto-initiées lors de l'encodage et/ou de la récupération lorsque que peu d'indices guident ces étapes (Frick et al., 2022; Guerrero-Sastoque et al., 2019, 2021; Taconnat et al., 2007, 2009). Les effets de l'âge sont plus marqués sur les tâches nécessitant le plus de stratégies auto-initiées et donc de ressources

exécutives (Guerrero-Sastoque et al., 2019; Taconnat et al., 2007, 2009). Par ailleurs, l'activité physique aurait des bénéfices importants sur les performances exécutives (par ex. Boucard et al., 2012; Dai et al., 2013; Gajewski & Falkenstein, 2015; Hillman et al., 2006; Huang et al., 2014; Ingold et al., 2020; Netz et al., 2011; Voelcker-Rehage et al., 2010; Wilbur et al., 2012). De par ces bénéfices, l'activité physique aurait un effet protecteur sur les tâches mnésiques les plus coûteuses en ressources, c'est-à-dire celles où les effets de l'âge sont les plus marqués. Ces résultats corroborent donc le fait que les bénéfices de l'activité physique seraient particulièrement visibles lors de tâches mnésiques complexes (Chodzko-Zajko, 1991; Chodzko-Zajko et al., 1992; Woo & Sharps, 2003). Ces résultats sont néanmoins à confirmer à l'aide d'autres tâches ou indicateurs mnésiques, impliquant différemment les ressources exécutives, tout en contrôlant les effets des autres facteurs de réserve pouvant également jouer un rôle dans les effets observés.

À notre connaissance, les études présentées ici sont les premières à souligner le rôle important des ressources exécutives dans les effets de l'activité physique sur la mémoire. Cependant, nos deux études ont été réalisées avec un protocole transversal impliquant des personnes qui ont un faible niveau d'activité physique *vs.* des personnes qui ont un plus haut niveau d'activité physique. Il serait intéressant de confirmer ces résultats avec d'autres protocoles expérimentaux, notamment interventionnels permettant d'impliquer les mêmes personnes avant et après la pratique d'activité physique. En effet, les Études 1 et 2 sont particulièrement intéressantes puisqu'elles permettent de donner de premières indications sur les liens existant entre l'activité physique, les fonctions exécutives et la mémoire chez les adultes âgés. Néanmoins, ces liens ne sont qu'estimés à l'aide d'analyses statistiques. Il serait donc important d'établir plus directement le lien de causalité entre les variables d'intérêt dans de futures études, plus poussées, notamment interventionnelles. De plus, les recherches développées pourront préciser ce lien entre activité physique, fonctions exécutives et mémoire, que ce soit au niveau cérébral comme au niveau comportemental. En effet, les mécanismes cognitifs sous-jacents aux bénéfices de l'activité physique sur la mémoire (i.e., fonctions exécutives) pourraient eux-mêmes dépendre de mécanismes neurobiologiques non investigués dans nos études. Ainsi, il serait pertinent pour de futures études d'explorer les mécanismes neurobiologiques associés aux bénéfices de l'activité physique au niveau du cortex préfrontal, permettant la mise en œuvre des fonctions exécutives. En effet, si les effets de l'activité physique sur la mémoire s'expliquent notamment par un meilleur fonctionnement exécutif, il est possible que ces effets soient sous-tendus par une réorganisation ou une préservation du cortex préfrontal. Au niveau comportemental, de nombreuses études indiquent que les fonctions exécutives sont impliquées dans la mise en place

de stratégies internes auto-initiées lors de l'encodage et/ou de la récupération (par ex. Guerrero-Sastoque et al., 2021). Ainsi, les effets de l'âge sur les fonctions exécutives se répercutent sur l'utilisation de stratégies, avec une utilisation moins importante des stratégies internes en faveur des stratégies externes chez les adultes âgés (Bouazzaoui et al., 2010). Il serait donc intéressant d'étendre les résultats observés dans les deux études présentées à l'utilisation de stratégies. En effet, si les effets bénéfiques de l'activité physique sur la mémoire s'expliquent par un maintien des fonctions exécutives malgré l'avancée en âge, l'utilisation de stratégies mnésiques auto-initiées devrait également être préservée. Aucune étude, à l'heure actuelle, ne fait le lien entre l'effet protecteur de l'activité physique et l'utilisation spontanée de stratégies mnésiques efficaces.

1.2. L'IMPLICATION DU CORPS VIA LA MOTRICITÉ ET L'ENVIRONNEMENT

Le second axe de recherche (Études 3 et 4) s'intéresse aux changements mnésiques de concepts d'action consécutifs aux modifications motrices liées au simulateur de vieillissement, en fonction du contexte environnemental (représentations sur le vieillissement). Selon l'approche incarnée et située de la cognition, les traces mnésiques dépendraient des expériences sensorimotrices et de l'interaction du corps avec l'environnement. En perturbant la motricité, la richesse sensorimotrice des traces mnésiques peut être modifiée, particulièrement pour les concepts impliquant la motricité (par ex. verbes d'action, objets manipulables). Les études perturbant la motricité utilisent des paradigmes d'immobilisation où le bras et la main dominants sont par exemple totalement immobilisés durant 24 heures (Villatte et al., 2021) mais aussi des paradigmes d'interférence où les mains sont non disponibles à la réalisation de l'action (si celle-ci devait réellement être réalisée) lors de la tâche mnésique (Dutriaux & Gyselinck, 2016b). À notre connaissance, l'Étude 4 est la première à utiliser des simulateurs de vieillissement comme paradigme de perturbation motrice. Les résultats ne permettent pas de montrer que les processus mnésiques sont incarnés dans les expériences sensorimotrices que nous avons réalisées puisque, selon nos résultats, le simulateur seul n'a pas influencé les performances mnésiques des verbes d'action. La question du temps de port demeure entière et particulièrement importante quant à l'hypothèse de traces mnésiques incarnées. Plus précisément, les effets du port du simulateur sur une durée courte pourraient différer de ceux observés sur une durée plus longue. Le vieillissement réel est un processus progressif, marqué par des diminutions mais également des compensations. Sur un temps court de port du simulateur, les changements sont brutaux et ne permettent pas la mise en place de mécanismes de compensation des effets du simulateur de

vieillissement. Sur un temps plus long, des mécanismes de compensation pourraient se mettre en place et faire émerger des différences inter-individuelles quant aux effets du simulateurs. Ainsi, la moindre « incarnation » des représentations indiquant que les adultes âgés se baseraient plus sur la modalité visuelle que sur les modalités impliquant le corps (Costello & Bloesch, 2017) pourrait ne pas être visible sur un temps de port court du simulateur.

Néanmoins, sur un temps de port court, l'importance de l'environnement dans la motricité (Études 3 et 4) et dans le lien mémoire-motricité (Étude 4) a pu être mise en évidence. Plus précisément, d'après l'approche incarnée et située, la perception d'un stimulus, ici les verbes, déclencherait une simulation mentale de l'action comprenant des éléments sensorimoteurs vécus au cours d'expériences passées. La différence entre les verbes d'action et de non-action repose sur une composante motrice. Lorsqu'un verbe de non-action est présenté à l'écran, la simulation sensorimotrice réalisée lors de l'encodage n'implique pas cette composante motrice. A l'inverse, lorsqu'un verbe d'action est présenté, la simulation sensorimotrice réalisée implique les composantes motrices, favorisant la discrimination entre cette trace mnésique et les autres traces en mémoire. Cependant, lorsqu'une modification motrice (ici, liée au port du simulateur) est associée à un contexte « menaçant », on observe des changements mnésiques, qui ne touchent que les concepts d'action. En d'autres termes, placer un adulte jeune dans une situation de vieillissement fictif, en prenant en compte à la fois les modifications motrices et les stéréotypes portés par la société, modifierait ses performances mnésiques en lien avec les compétences motrices altérées.

L'originalité et la particularité des études menées dans ce second axe étaient d'étudier le vieillissement fictif chez des adultes jeunes. Les résultats suggèrent que l'environnement serait primordial dans l'émergence des traces mnésiques, lorsque celles-ci sont en lien avec la motricité, elle-même diminuée. Les liens entre mémoire, motricité et environnement pourraient être étendus aux adultes âgés pour qui les modifications motrices et mnésiques sont liées à l'avancée en âge et qui sont directement concernés par les stéréotypes. Les recherches supplémentaires sur une moindre incarnation des éléments en mémoire sont d'autant plus importantes que les résultats observés chez les adultes âgés sont contradictoires. Alors qu' une diminution motrice chez des adultes jeunes a été rapportée comme étant associée à des changements cognitifs (Bidet-Ildei et al., 2017; Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Toussaint et al., 2023; Villatte et al., 2021), dont mnésiques (Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Villatte et al., 2021), le lien entre diminution motrice et mnésique n'est pas consensuel chez les adultes âgés (Dijkstra et al., 2007; Dutriaux et al., 2021). Par ailleurs, ces liens entre motricité et mémoire sont étudiés

en dehors du contexte environnemental dans lequel les adultes âgés sont placés. Les stéréotypes sur le vieillissement étant des auto-stéréotypes dans cette population (Levy, 2003), il semble important d'évaluer leurs effets sur les composantes sensorimotrices impliquées dans les processus mnésiques. En effet, les individus évoluent dans un environnement, physique comme social, duquel il est difficile voire impossible de se détacher. La cognition prend donc naissance à partir des interactions avec son environnement. L'Étude 4, bien que centrée sur les adultes jeunes, encourage à explorer les effets conjoints d'une diminution motrice et d'un environnement social pouvant être « menaçant » sur la mémoire chez les adultes âgés.

1.3. DES LIENS COMMUNS ENTRE MOTRICITÉ, ACTIVITÉ PHYSIQUE, MÉMOIRE ET ENVIRONNEMENT ?

D'autres méthodologies peuvent être pensées afin d'étudier les liens existant entre cognition (fonctionnement exécutif et mémoire), motricité et environnement. Dans l'Étude 4, une diminution de la motricité a été expérimentalement induite afin d'établir l'importance de la motricité et de l'environnement dans l'émergence des traces mnésiques. Il semble possible d'envisager qu'une amélioration de la motricité puisse, en retour, être bénéfique à la qualité de la trace mnésique. En d'autres termes, si les traces mnésiques sont modales, une intervention en activité physique ou des stimulations motrices permettraient de favoriser les composantes motrices au sein des traces mnésiques. Malgré une moindre incarnation des processus mnésiques chez les adultes âgés suggérée par Costello et Bloesch (2017), la pratique d'activité physique pourrait favoriser l'incarnation des processus mnésiques au sein de cette population. Le lien entre corps et mémoire passant par l'activité physique pourrait également être mis en évidence par une amélioration de la motricité. De nombreuses études ont d'ores et déjà souligné les bénéfices de l'activité physique sur la motricité des adultes âgés (Buchman et al., 2007; James et al., 2012; voir Levin et al., 2017 pour une revue systématique). De futures études pourraient donc développer des protocoles expérimentaux permettant la mise en évidence du lien bénéfique entre activité physique et mémoire au travers une amélioration de la motricité, en utilisant par exemple des concepts d'action (i.e., objets manipulables, verbes d'action).

De plus, récemment, Piggin (2020) a proposé une définition de l'activité physique qui ne représente plus uniquement les aspects anatomiques et physiologiques, tels que décrits par Caspersen et al. (1985), mais comme impliquant « des personnes qui bougent, agissent et réalisent des activités dans des espaces et des contextes culturels spécifiques, sous l'influence

d'un ensemble d'intérêts, d'émotions, d'idées, d'instructions et de relations »[12]. Cette définition considère donc l'activité physique comme dépendante de l'environnement culturel, social et physique (par ex. dans un milieu urbain ou rural, plus ou moins prévisible). Différentes études soulignent effectivement que les effets de l'activité physique sur la cognition diffèrent selon le contexte socio-démographique (Schmidt et al., 2017), le contexte social (Emile et al., 2014) mais également le contexte physique (Gu et al., 2019). Par exemple, les activités physiques impliquant des aptitudes « ouvertes » (i.e., dans un environnement imprévisible, nécessitant une adaptabilité et une modification des réponses motrices aux stimuli aléatoires, par ex. tennis de table, basketball) semblent permettre des bénéfices plus importants sur la cognition que les activités physiques impliquant des aptitudes « fermées » (i.e., dans un environnement prévisible, stable, impliquant des mouvements moteurs préétablis, par ex. course à pied, natation), bien que les deux soient bénéfiques pour la cognition (Gu et al., 2019). Cette définition plus holistique rend compte de la complexité de l'étude des effets de l'activité physique, qui pourraient donc dépendre également de l'environnement.

En résumé, l'activité physique serait liée à la mémoire grâce à une amélioration ou un maintien (1) du fonctionnement exécutif, soutenant la mémoire et (2) de la motricité, permettant de développer des traces mnésiques modales plus distinctes et plus précises. Ces deux changements seraient néanmoins dépendants du contexte environnemental dans lequel ils ont lieu. Par ailleurs, les mêmes questionnements peuvent être considérés pour les activités motrices de plus faible intensité mais stimulantes, telles que le tricot, la couture ou encore la peinture. En effet, de par leurs implications motrices, celles-ci pourraient être bénéfiques pour la qualité des traces mnésiques elles-mêmes. Ces activités, grâce aux stimulations qu'elles induisent, pourraient aussi être bénéfiques pour le fonctionnement exécutif, soutenant l'encodage et la récupération de la mémoire. En d'autres termes, d'autres activités sensorimotrices et stimulantes pourraient être étudiées afin de rendre compte de ces liens importants entre corps et mémoire. La compréhension de ces bénéfices est particulièrement importante puisqu'elle soutient les programmes d'intervention auprès des adultes âgés. En favorisant la compréhension des mécanismes sous-jacents aux liens entre corps et mémoire, ainsi que l'importance de l'environnement dans ces liens, les interventions proposées aux adultes âgés pourraient être améliorées.

[12] Piggin (2020, p. 5)

2. UN MODÈLE PLUS COMPLET DE L'IMPLICATION DU CORPS ET DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE FONCTIONNEMENT MNÉSIQUE

La mémoire, les fonctions exécutives, la motricité et l'activité physique pourraient être considérées au sein d'un seul et même modèle. Ce dernier représenterait les liens et influences mutuelles entre chacun de ces facteurs deux à deux mais également l'existence de liens complexes entre l'ensemble des composants (**Figure 2**).

2.1. UNE APPROCHE COGNITIVISTE *VS.* INCARNÉE ET SITUÉE DE LA MÉMOIRE À UN MODÈLE PLUS COMPLET DU FONCTIONNEMENT MNÉSIQUE

Les études menées dans cette thèse révèlent deux modes d'action différents de la motricité sur les processus mnésiques. L'activité physique serait bénéfique pour les fonctions exécutives, permettant de soutenir le fonctionnement mnésique lors de l'encodage et/ou de la récupération. La motricité, en lien avec l'environnement social, influencerait le contenu même des traces mnésiques. Ces deux modes d'action ont été étudiés à partir de courants distincts dans la littérature (Meteyard et al., 2012). Bien que les représentations sensorimotrices soient de plus en plus étudiées, l'approche cognitiviste a permis de souligner l'importance des facteurs généraux (par ex. fonctions exécutives) dans le fonctionnement mnésique. A l'inverse, l'approche incarnée et située décrit particulièrement bien l'importance du corps et de l'environnement. En effet, Varela (1992) indique que les termes « incarné » et « situé » permettent de souligner que la cognition dépend des expériences vécues par un corps possédant des capacités sensorimotrices et que ces capacités sensorimotrices sont elles-mêmes intégrées dans un contexte biologique, psychologique, environnemental et culturel particulier. Néanmoins, l'implication d'autres facteurs, notamment les fonctions exécutives, est trop souvent oubliée dans cette approche incarnée et située de la cognition. Récemment, le terme « fonctionnement exécutif » a été proposé pour rendre compte des « fonctions exécutives » au sein de l'approche incarnée et située de la cognition (Mooruth, 2021). Bien que la différence entre ces deux termes semble légère, celle-ci permet de considérer l'existence de telles ressources dans une approche incarnée et située. En effet, le « fonctionnement exécutif » traduirait le produit ou la conséquence de processus sensorimoteurs, et non plus un système duquel sont extraites des fonctions (i.e., inhibition, mise à jour en mémoire de travail, flexibilité). Ce fonctionnement exécutif serait alors dynamique puisqu'en constante interaction avec l'environnement et toujours en lien avec les autres processus (cognitifs, perceptifs, d'action) afin d'atteindre un but précis. Ainsi, il serait

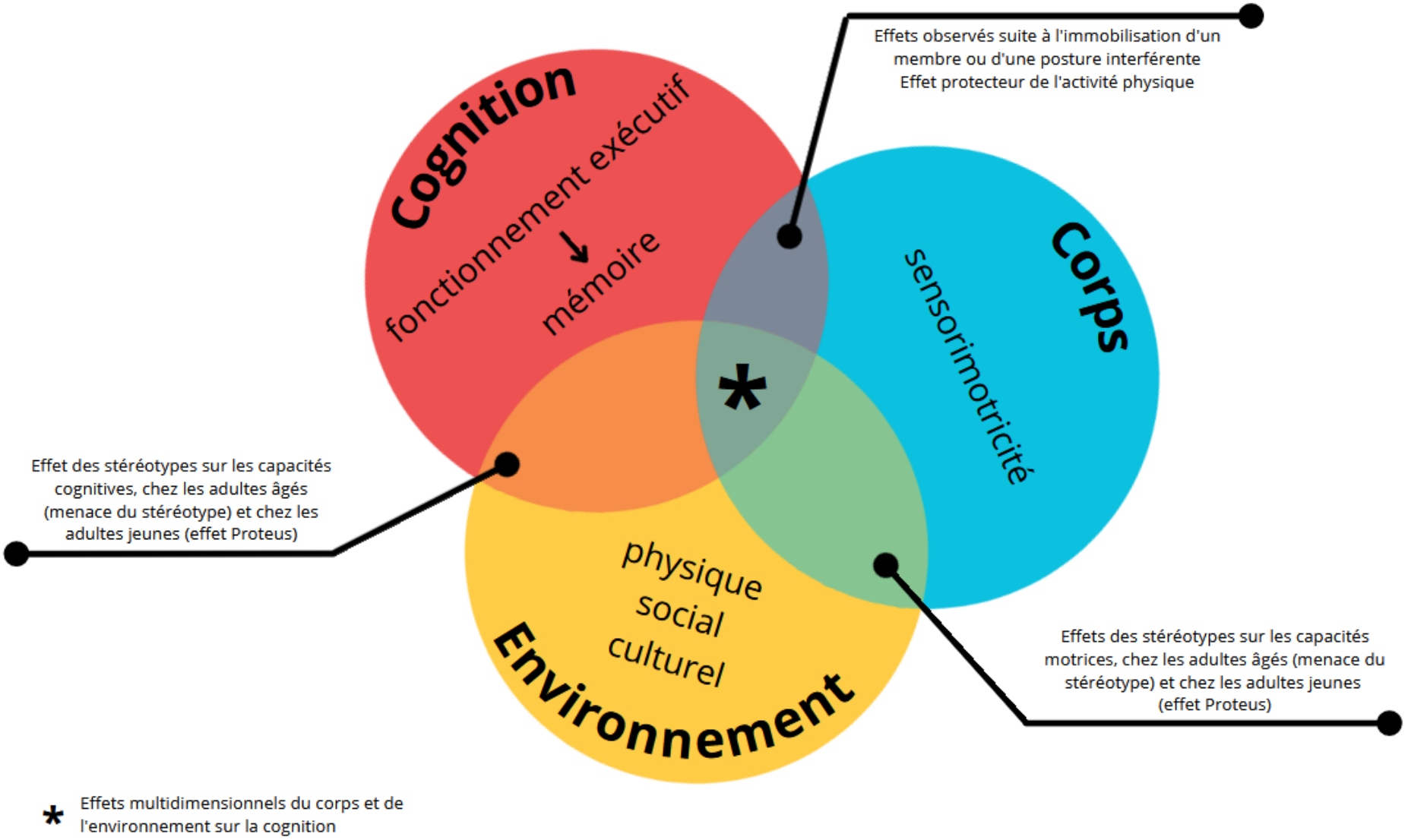


Figure 2. Représentation schématique des liens entre cognition, corps et environnement

possible de présenter les facteurs s'influençant mutuellement pour constituer une mémoire incarnée dans un corps et située dans un environnement particulier, tout en considérant que le fonctionnement exécutif, lui-même issu de l'interaction du corps avec l'environnement, puisse soutenir la mémoire (**Figure 2**).

2.2. LES DÉFIS POUR L'ÉTUDE HOLISTIQUE DU VIEILLISSEMENT

Récemment, Kuehn et al. (2018) ont proposé d'étudier les changements neuronaux, cognitifs mais également de la vie quotidienne au regard des modifications des capacités sensorimotrices liés à l'âge. Ainsi, les difficultés fonctionnelles rencontrées par les adultes âgés pourraient être diminuées par une évaluation et une prise en charge plus adaptée, considérant les aspects sensorimoteurs et environnementaux. Un des défis importants de la recherche basée sur une approche incarnée et située est donc son utilisation dans la clinique auprès d'adultes âgés. Cette approche permettrait une prise en compte et une évaluation plus holistique de la personne, indissociable de son corps et de son environnement. Il est alors nécessaire de développer des outils d'évaluation et des protocoles d'intervention en lien avec l'approche incarnée et située.

Premièrement, un changement d'approche dans l'évaluation des effets de l'âge sur les processus cognitifs implique la création de nouveaux outils, notamment plus écologiques. En effet, les outils existants ne sont pas toujours adéquats pour évaluer les processus cognitifs et leurs composantes sensorimotrices et environnementales (Launay et al., en révision). La définition des processus mnésiques selon l'approche incarnée et située inclut un ensemble de facteurs à la fois environnementaux et individuels. Cette définition revêt un caractère écologique, qui se veut proche d'une vision holistique. Il serait important d'évaluer les modèles et hypothèses posés par l'approche incarnée et située dans des contextes écologiques appropriés. Néanmoins, les études menées dans la littérature comme dans ce travail de thèse utilisent du matériel expérimental parfois éloigné de la réalité dans laquelle évoluent les individus. Bien que cette approche expérimentale soit nécessaire pour étudier plus précisément le phénomène et isoler ou manipuler des variables d'intérêt, il serait important de replacer ces recherches dans une approche plus écologique afin de rendre compte au mieux des processus cognitifs tels qu'ils sont déployés dans leur contexte initial. Deuxièmement, un changement d'approche implique également la mise en place d'interventions adaptées auprès d'adultes âgés. Ces interventions devraient s'appuyer sur les liens existant entre mémoire, sensorimotricité et environnement, et non plus réaliser des interventions distinctes pour chacun des composants un à un (mnésique, sensorimoteur et environnemental).

La réalité virtuelle a récemment été proposée comme un outil « incarné » permettant une évaluation se rapprochant d'une vision écologique de la mémoire (Corriveau Lecavalier et al., 2020; Ouellet et al., 2018) mais également permettant d'améliorer la mémoire chez les adultes âgés (Repetto et al., 2016). La réalité virtuelle permet aux utilisateurs d'interagir dans des environnements virtuels mais perçus comme proches de la réalité donnant une perception subjective d'être en action dans ce monde virtuel. Une évaluation de la mémoire à l'aide d'un magasin virtuel a été proposée (Corriveau Lecavalier et al., 2020; Ouellet et al., 2018), permettant une interaction du corps avec un environnement particulier, adaptable. L'utilisation de la réalité virtuelle comme intervention est d'autant plus intéressante qu'un mouvement virtuel pourrait induire une simulation motrice et influencer positivement le traitement linguistique de verbes d'action chez les adultes jeunes (Repetto et al., 2015). Ces mêmes bénéfices pourraient alors être observés sur la mémoire, auprès de populations âgées. Bien qu'aucune étude interventionnelle basée sur une approche incarnée et située de la cognition n'ait été réalisée chez les adultes âgés, l'utilisation de la réalité virtuelle pourrait être une première piste. En effet, en considérant que les mouvements virtuels aient des effets proches des mouvements réels sur les processus cognitifs, cela représente une opportunité de stimulation motrice, et par conséquent cognitive, importante malgré les effets de l'âge sur ces capacités.

De manière intéressante, la réalité virtuelle a d'ores et déjà permis de souligner des effets bénéfiques de l'utilisation d'avatars jeunes sur la pratique d'activité physique chez des adultes âgés (Tammy Lin & Wu, 2021). En effet, les personnes âgées incarnant un avatar plus jeune en réalité virtuelle consacrent plus d'efforts à l'exercice physique proposé dans la salle de sport virtuelle. Cet effet n'est observé que lors de la phase d'exercice et ne se maintient pas en dehors de la réalité virtuelle. Néanmoins, cette étude peut servir de base intéressante à de futures interventions. Par exemple, la répétition des interventions en réalité virtuelle dans le temps pourrait modifier l'investissement des adultes âgés dans les activités physiques sur un plus long terme, en-dehors du dispositif de réalité virtuelle. Ces bénéfices pourraient s'expliquer, entre autre, par des changements motivationnels et/ou une perception de ses capacités physiques plus positives, contrant certains stéréotypes sur la pratique d'activité physique chez les adultes âgés (Chalabaev et al., 2013). Ainsi, en modifiant l'environnement par la réalité virtuelle, il serait possible de modifier la pratique d'activité physique, stimuler la motricité, et par conséquent soutenir les capacités cognitives, et notamment les capacités mnésiques.

Bien que la réalité virtuelle permette de contrôler et/ou faire varier certains facteurs expérimentalement, elle ne représente pas totalement les évènements tels qu'ils sont dans un

environnement réel. Des méthodologies et appuis théoriques divers ont permis d'identifier, de caractériser et d'expliquer les changements liés à l'avancée en âge dans un contexte de laboratoire. Néanmoins, afin de considérer plus précisément les liens entre cognition, sensorimotricité et environnement, il est important de compléter ces études par des mesures et/ou des observations issues d'études écologiques, i.e., réalisées dans le quotidien des individus. Ces études écologiques permettraient, par ailleurs, de considérer l'hétérogénéité inter- et intra-individuelle dans les capacités intrinsèques (cognitives, physiques, psychologiques) ainsi que l'environnement (physique, social, culturel) dans lesquels ces aptitudes émergent. Par exemple, les évaluations écologiques momentanées (*Ecological Momentary Assessment*, EMA) rassemblent différentes approches basées sur des mesures répétées au quotidien, presque en temps réel (Crawford et al., 2022). Cette méthodologie longitudinale permet alors de considérer le contexte environnemental ainsi que les capacités intrinsèques dans un contexte écologique. En ce sens, les études en contexte de laboratoire et écologique (par ex., EMA) pourraient être complémentaires dans l'étude du vieillissement (voir **Figure 3** pour une comparaison de ces deux approches). Chacune de ces approches ayant des avantages et des limites différents, la prise en compte des résultats de ces deux approches conjointement permettrait de mieux représenter et caractériser les changements, qu'ils soient cognitifs ou sensorimoteurs, liés à l'avancée en âge.

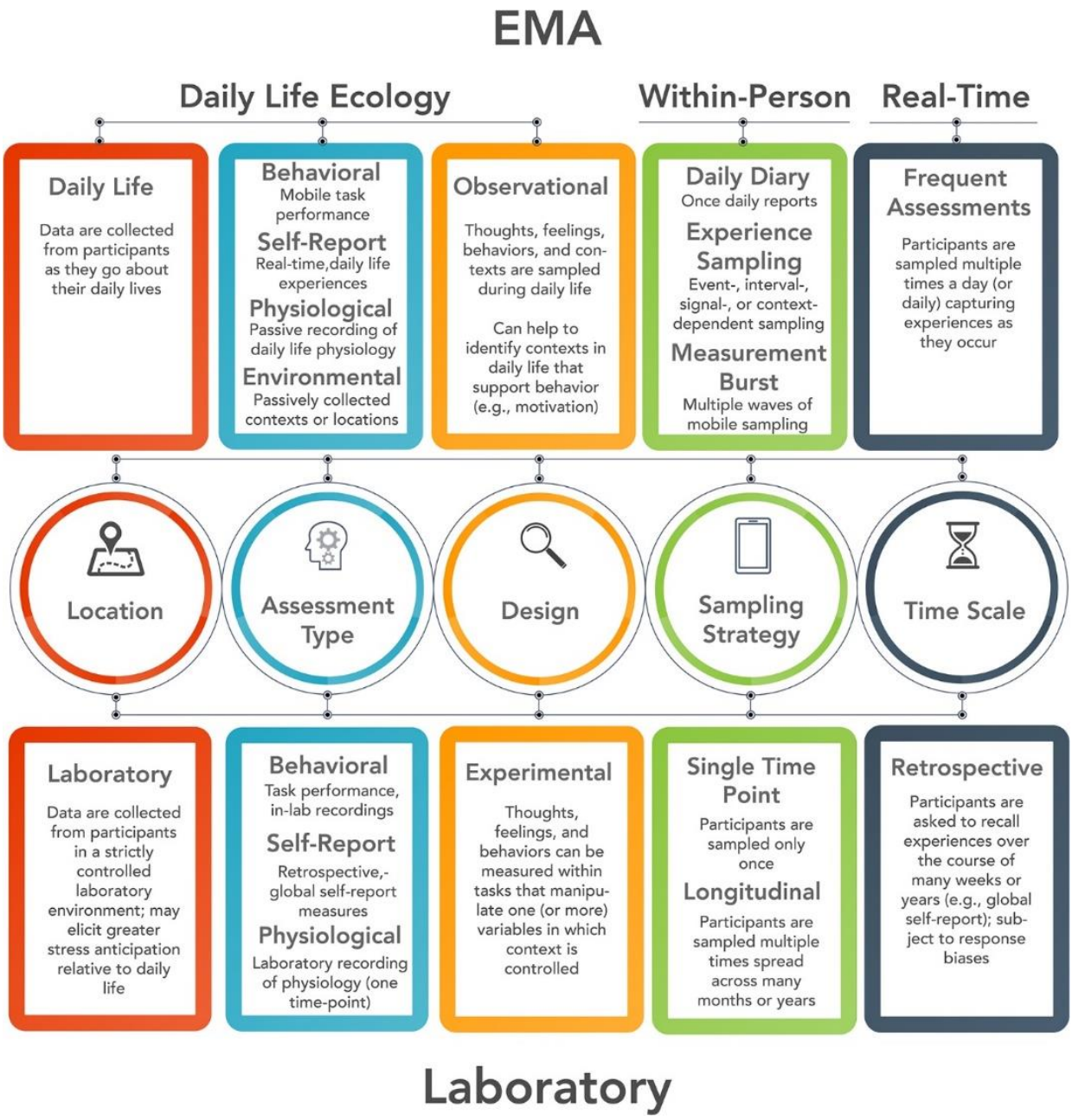


Figure 3. Comparaison entre les études en contexte de laboratoire et l'*Ecological Momentary Assessment* (EMA) issu de Crawford et al. (2022)

Conclusion

Ce travail de thèse visait à étudier l'implication du corps et de l'environnement dans les processus mnésiques au travers de deux facteurs : l'activité physique et la motricité. Les études réalisées ont permis de montrer leur implication à des niveaux différents du fonctionnement mnésique. D'une part, l'activité physique est bénéfique pour les fonctions exécutives, soutenant les aspects stratégiques de la mémoire, et donc les performances de mémoire. D'autre part, la motricité, en lien avec l'environnement social, serait impliquée dans l'émergence des traces mnésiques elles-mêmes.

Concernant l'activité physique, deux études transversales ont été réalisées afin de mettre en évidence l'effet bénéfique de l'activité physique sur la mémoire s'expliquant par un maintien du fonctionnement exécutif. Certaines études évaluant différentes tâches mnésiques (par ex. reconnaissance et rappel libre) montrent des effets bénéfiques de l'activité physique sur ces tâches (par ex. Gajewski et al., 2023). Bien que certains auteurs aient souligné les effets bénéfiques de l'activité physique sur les tâches mnésiques les plus complexes (Chodzko-Zajko, 1991; Chodzko-Zajko et al., 1992; Woo & Sharps, 2003), les études réalisées dans ce travail doctoral sont, à notre connaissance, les premières à expliquer les effets de l'activité physique par les capacités exécutives. Une des principales limites de ces études concerne l'approche transversale utilisée. Néanmoins, bien que nos études soient également basées sur ce type d'approche, elles permettent de donner un premier élan à de futures recherches, notamment interventionnelles, investiguant ces liens.

Concernant la motricité, deux études ont été réalisées à l'aide de simulateurs de vieillissement mimant un vieillissement physique chez des adultes jeunes. Ces deux études permettent de mettre en avant le rôle important de l'environnement dans les performances motrices comme mnésiques. Plus particulièrement, l'interaction entre l'environnement et les capacités motrices pourrait être à l'origine d'une diminution des performances mnésiques de concepts d'action. Bien que certaines études aient déjà investigué les liens entre diminution motrice et performances mnésiques de concepts d'action (Dutriaux & Gyselinck, 2016b; Villatte et al., 2021), les études menées dans ce travail de thèse sont les premières, à notre connaissance, à utiliser des simulateurs de vieillissement et à inclure l'environnement social. Les résultats permettent d'encourager l'étude des liens entre le corps, l'environnement et la mémoire. Les études futures devront explorer davantage ces liens auprès de la population d'adultes âgés pour qui les diminutions motrices sont progressives et les stéréotypes sur le vieillissement sont devenus des auto-stéréotypes.

Il existe d'autres méthodologies et protocoles expérimentaux permettant de mettre en évidence cette implication, tout en soulignant l'importance de l'environnement dans ces liens entre corps et mémoire. Par exemple, ces mêmes facteurs (i.e., cognition, activité physique, motricité et environnement) pourraient être étudiés ensemble. En effet, de nombreuses études appuient les liens entre ces différents facteurs deux à deux suggérant que l'activité physique pourrait être bénéfique pour les fonctions exécutives, la mémoire, la motricité et dépendre de l'environnement. Ainsi, l'activité physique pourrait être bénéfique pour les composantes motrices au sein des traces mnésiques, et ce, en fonction de l'environnement et du contexte dans lequel la personne est placée. De futures études, notamment interventionnelles et/ou écologiques, pourront alors investiguer ces liens complexes, afin de rendre compte au mieux de la dynamique des processus mnésiques.

Références bibliographiques

Abichou, K., La Corte, V., Sperduti, M., Gaston-Bellegarde, A., Nicolas, S., & Piolino, P. (2021). The production of false recognition and the associated state of consciousness following encoding in a naturalistic context in aging. *Consciousness and Cognition*, *90*, 103097. https://doi.org/10.1016/j.concog.2021.103097

Adolfsdottir, S., Wollschlaeger, D., Wehling, E., & Lundervold, A. (2016). Inhibition and Switching in Healthy Aging : A Longitudinal Study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *23*, 1-8. https://doi.org/10.1017/S1355617716000898

Aghjayan, S. L., Bournias, T., Kang, C., Zhou, X., Stillman, C. M., Donofry, S. D., Kamarck, T. W., Marsland, A. L., Voss, M. W., Fraundorf, S. H., & Erickson, K. I. (2022). Aerobic exercise improves episodic memory in late adulthood : A systematic review and meta-analysis. *Communications Medicine*, *2*(1). https://doi.org/10.1038/s43856-022-00079-7

Ainslie, P. N., Cotter, J. D., George, K. P., Lucas, S., Murrell, C., Shave, R., Thomas, K. N., Williams, M. J. A., & Atkinson, G. (2008). Elevation in cerebral blood flow velocity with aerobic fitness throughout healthy human ageing. *The Journal of Physiology*, *586*(16), 4005-4010. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.158279

Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz, A. M., Strath, S. J., O???Brien, W. L., Bassett, D. R., Schmitz, K. H., Emplaincourt, P. O., Jacobs, D. R., & Leon, A. S. (2000). Compendium of Physical Activities : An update of activity codes and MET intensities: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *32*(Supplement), S498-S516. https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009

Albinet, C., Fezzani, K., & Thon, B. (2008). Vieillissement, activité physique et cognition. *Movement & Sport Sciences*, *63*(1), 9-36. https://doi.org/10.3917/sm.063.0009

Albinet, C., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2010). Increased heart rate variability and executive performance after aerobic training in the elderly. *European Journal of Applied Physiology*, *109*(4), 617-624. https://doi.org/10.1007/s00421-010-1393-y

Albinet, C., Mandrick, K., Bernard, P. L., Perrey, S., & Blain, H. (2014). Improved cerebral oxygenation response and executive performance as a function of cardiorespiratory fitness in older women : A fNIRS study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00272

Allain, P., Nicoleau, S., Pinon, K., Etcharry-Bouyx, F., Barré, J., Berrut, G., Dubas, F., & Gall, D. L. (2005). Executive functioning in normal aging : A study of action planning using the Zoo Map Test. *Brain and Cognition*, *57*(1), 4-7. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.08.011

Allan, J. L., McMinn, D., & Daly, M. (2016). A Bidirectional Relationship between Executive Function and Health Behavior : Evidence, Implications, and Future Directions. *Frontiers in Neuroscience*, *10*, 386. https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00386

Allen, K. (2018). The Effect of an Aging Suit on Young and Middle-Aged Adults' Attitudes Toward Older Adults. Health, Human Performance and Recreation Undergraduate Honors Theses Retrieved from https://scholarworks.uark.edu/hhpruht/61

Aly, M., & Moscovitch, M. (2010). The effects of sleep on episodic memory in older and younger adults. *Memory*, *18*(3), 327-334. https://doi.org/10.1080/09658211003601548

Andel, R., Kåreholt, I., Parker, M. G., Thorslund, M., & Gatz, M. (2007). Complexity of primary lifetime occupation and cognition in advanced old age. *Journal of Aging and Health*, *19*(3), 397-415. https://doi.org/10.1177/0898264307300171

André, N., Ferrand, C., Albinet, C., & Audiffren, M. (2018). Audi. *Journal of Aging Research*, *2018*, 1-9. https://doi.org/10.1155/2018/8917535

Angel, L., Isingrini, M., Bouazzaoui, B., Taconnat, L., Allan, K., Granjon, L., & Fay, S. (2010). The amount of retrieval support modulates age effects on episodic memory : Evidence from event-related potentials. *Brain Research*, *1335*, 41-52. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.040

Angevaren, M., Aufdemkampe, G., Verhaar, H., Aleman, A., & Vanhees, L. (2008). Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. In The Cochrane Collaboration (Éd.), *Cochrane Database of Systematic Reviews* (p. CD005381.pub3). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/14651858.CD005381.pub3

Anstey, K. J., Luszcz, M. A., & Sanchez, L. (2001). Two-Year Decline in Vision but Not Hearing Is Associated with Memory Decline in Very Old Adults in a Population-Based Sample. *Gerontology*, *47*(5), 289-293. https://doi.org/10.1159/000052814

Armstrong, B., Gallant, S. N., Li, L., Patel, K., & Wong, B. I. (2017). Stereotype Threat Effects on Older Adults' Episodic and Working Memory : A Meta-Analysis. *The Gerontologist*, *57*(suppl_2), S193-S205. https://doi.org/10.1093/geront/gnx056

Artuso, C., Cavallini, E., Bottiroli, S., & Palladino, P. (2017). Updating working memory : Memory load matters with aging. *Aging Clinical and Experimental Research*, *29*(3), 371-377. https://doi.org/10.1007/s40520-016-0581-y

Atkinson, H. H., Rosano, C., Simonsick, E. M., Williamson, J. D., Davis, C., Ambrosius, W. T., Rapp, S. R., Cesari, M., Newman, A. B., Harris, T. B., Rubin, S. M., Yaffe, K., Satterfield, S., & Kritchevsky, S. B. (2007). Cognitive Function, Gait Speed Decline, and Comorbidities : The Health, Aging and Body Composition Study. *The Journals of Gerontology: Series A*, *62*(8), 844-850. https://doi.org/10.1093/gerona/62.8.844

Audiffren, M., & André, N. (2019). The exercise–cognition relationship : A virtuous circle. *Journal of Sport and Health Science*, *8*(4), 339-347. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2019.03.001

Audiffren, M., André, N., & Albinet, C. (2011). Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors : Bilan et perspectives. *Revue de neuropsychologie*, *3*(4), 207. https://doi.org/10.3917/rne.034.0207

Baecke, J. A., Burema, J., & Frijters, J. E. (1982). A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *36*(5), 936-942. https://doi.org/10.1093/ajcn/36.5.936

Balota, D. A., Dolan, P. O., & Duchek, J. M. (2000). Memory changes in healthy older adults. In *The Oxford handbook of memory* (p. 295-409). Oxford University Press.

Baltes, P. B., & Lindenberger, U. (1997). Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: A new window to the study of cognitive aging? *Psychology and Aging*, 12(1), 12–21. https://doi.org/10.1037/0882-7974.12.1.12

Barber, S. J. (2017). An Examination of Age-Based Stereotype Threat About Cognitive Decline : Implications for Stereotype-Threat Research and Theory Development. *Perspectives on Psychological Science*, *12*(1), 62-90. https://doi.org/10.1177/1745691616656345

Barber, S. J., Hamel, K., Ketcham, C., Lui, K., & Taylor-Ketcham, N. (2020a). The effects of stereotype threat on older adults' walking performance as a function of task difficulty and resource evaluations. *Psychology and Aging*, *35*(2), 250-266. https://doi.org/10.1037/pag0000440

Barber, S. J., Hamel, K., Ketcham, C., Lui, K., & Taylor-Ketcham, N. (2020b). The effects of stereotype threat on older adults' walking performance as a function of task difficulty and resource evaluations. *Psychology and Aging*, *35*(2), 250-266. https://doi.org/10.1037/pag0000440

Barber, S. J., & Mather, M. (2013). Stereotype Threat can Reduce Older Adults' Memory Errors. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(10), 1888-1895. https://doi.org/10.1080/17470218.2013.840656

Barha, C. K., Davis, J. C., Falck, R. S., Nagamatsu, L. S., & Liu-Ambrose, T. (2017). Sex differences in exercise efficacy to improve cognition : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in older humans. *Frontiers in Neuroendocrinology*, *46*, 71-85. https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2017.04.002

Barry, B. K., & Carson, R. G. (2004). The Consequences of Resistance Training for Movement Control in Older Adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *59*(7), M730-M754. https://doi.org/10.1093/gerona/59.7.M730

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 617-645. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639

Bartrés-Faz, D., & Arenaza-Urquijo, E. M. (2011). Structural and Functional Imaging Correlates of Cognitive and Brain Reserve Hypotheses in Healthy and Pathological Aging. *Brain Topography*, *24*(3-4), 340-357. https://doi.org/10.1007/s10548-011-0195-9

Barulli, D., & Stern, Y. (2013). Efficiency, capacity, compensation, maintenance, plasticity : Emerging concepts in cognitive reserve. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(10), 502-509. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.012

Bassolino, M., Bove, M., Jacono, M., Fadiga, L., & Pozzo, T. (2012). Functional effect of short-term immobilization : Kinematic changes and recovery on reaching-to-grasp. *Neuroscience*, *215*, 127-134. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.04.019

Beaudoin, M., Barra, J., Dupraz, L., Mollier-Sabet, P., & Guerraz, M. (2020). The impact of embodying an “elderly” body avatar on motor imagery. *Experimental Brain Research*, *238*(6), 1467-1478. https://doi.org/10.1007/s00221-020-05828-5

Best, J. R., Nagamatsu, L. S., & Liu-Ambrose, T. (2014). Improvements to executive function during exercise training predict maintenance of physical activity over the following year. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00353

Bherer, L., Erickson, K. I., & Liu-Ambrose, T. (2013). A Review of the Effects of Physical Activity and Exercise on Cognitive and Brain Functions in Older Adults. *Journal of Aging Research*, *2013*, 1-8. https://doi.org/10.1155/2013/657508

Bherer, L., & Pothier, K. (2021). Physical Activity and Exercise. In T. Strobach & J. Karbach (Éds.), *Cognitive Training* (p. 319-330). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39292-5_22

Bidet-Ildei, C., Gimenes, M., Toussaint, L., Almecija, Y., & Badets, A. (2017). Sentence plausibility influences the link between action words and the perception of biological human movements. *Psychological Research*, *81*(4), 806-813. https://doi.org/10.1007/s00426-016-0776-z

Bigard, A.X., Duforez, F., Portero, P., & Guézennec, C.Y. (1992). Détermination de l'activité physique par questionnaire: validation du questionnaire autoadministrable de Baecke. *Science & Sports*, 7, 215-221. https://doi.org/10.1016/S0765-1597(05)80093-0

Boisgontier, M. P., Olivier, I., Chenu, O., & Nougier, V. (2012). Presbypropria : The effects of physiological ageing on proprioceptive control. *AGE*, *34*(5), 1179-1194. https://doi.org/10.1007/s11357-011-9300-y

Bopp, K. L., & Verhaeghen, P. (2018). Aging and n-Back Performance : A Meta-Analysis. *The Journals of Gerontology: Series B*. https://doi.org/10.1093/geronb/gby024

Borst, S. E., De Hoyos, D. V., Garzarella, L., Vincent, K., Pollock, B. H., Lowenthal, D. T., & Pollock, M. L. (2001). Effects of resistance training on insulin-like growth factor-I and IGF binding proteins. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *33*(4), 648 –653. https://doi.org/10.1097/00005768-200104000-00021.

Bouazzaoui, B., Angel, L., Fay, S., Taconnat, L., Charlotte, F., & Isingrini, M. (2014). Does the greater involvement of executive control in memory with age act as a compensatory mechanism? *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *68*(1), 59-66. https://doi.org/10.1037/cep0000005

Bouazzaoui, B., Fay, S., Guerrero-Sastoque, L., Semaine, M., Isingrini, M., & Taconnat, L. (2020). Memory Age-based Stereotype Threat : Role of Locus of Control and Anxiety. *Experimental Aging Research*, *46*(1), 39-51. https://doi.org/10.1080/0361073X.2019.1693009

Bouazzaoui, B., Fay, S., Taconnat, L., Angel, L., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2013). Differential involvement of knowledge representation and executive control in episodic memory performance in young and older adults. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *67*(2), 100-107. https://doi.org/10.1037/a0028517

Bouazzaoui, B., Follenfant, A., Ric, F., Fay, S., Croizet, J.-C., Atzeni, T., & Taconnat, L. (2016). Ageing-related stereotypes in memory : When the beliefs come true. *Memory*, *24*(5), 659-668. https://doi.org/10.1080/09658211.2015.1040802

Bouazzaoui, B., Isingrini, M., Fay, S., Angel, L., Vanneste, S., Clarys, D., & Taconnat, L. (2010). Aging and self-reported internal and external memory strategy uses : The role of executive functioning. *Acta Psychologica*, *135*(1), 59-66. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.05.007

Boucard, G. K., Albinet, C. T., Bugaiska, A., Bouquet, C. A., Clarys, D., & Audiffren, M. (2012). Impact of Physical Activity on Executive Functions in Aging : A Selective Effect on Inhibition Among Old Adults. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *34*(6), 808-827. https://doi.org/10.1123/jsep.34.6.808

Bouccara, D., Ferrary, E., Mosnier, I., Bozorg Grayeli, A., & Sterkers, O. (2005). Presbyacousie. *EMC - Oto-rhino-laryngologie*, *2*(4), 329-342. https://doi.org/10.1016/j.emcorl.2005.09.004

Boudjemad, V., & Gana, K. (2009). L’âgisme : Adaptation française d’une mesure et test d’un modèle structural des effets de l’empathie, l’orientation à la dominance sociale et le dogmatisme sur l’âgisme. *Canadian Journal on Aging / La Revue canadienne du vieillissement*, *28*, 371-389. https://doi.org/10.1017/S071498080999016X

Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2006). Cross-talk between Language Processes and Overt Motor Behavior in the First 200 msec of Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(10), 1607-1615. https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.10.1607

Bowden, A., Wilson, V. J., Traynor, V., & Chang, H. C. (2019). *« In My Shoes » Can wearing an age-suit increase person-centred practices for the hospitalised older adult? Faculty of Science, Medicine and Health - Papers: Part B*. Retrieved from https://ro.uow.edu.au/smhpapers1/1010

Bowden, A., Wilson, V., Traynor, V., & Chang, H. (Rita). (2020). Exploring the use of ageing simulation to enable nurses to gain insight into what it is like to be an older person. *Journal of Clinical Nursing*, *29*(23-24), 4561-4572. https://doi.org/10.1111/jocn.15484

Boywitt, C. D., Kuhlmann, B. G., & Meiser, T. (2012). The role of source memory in older adults' recollective experience. *Psychology and Aging*, *27*(2), 484-497. https://doi.org/10.1037/a0024729

Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M., & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory : Sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, *35*(4), 1081-1088. https://doi.org/10.1037/a0015537

Brunel, L., Lesourd, M., Labeye, E., & Versace, R. (2010). The sensory nature of knowledge : Sensory priming effects in semantic categorization. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*, 955-964. https://doi.org/10.1080/17470210903134369

Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2005). Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system : A combined TMS and behavioral study. *Cognitive Brain Research*, *24*(3), 355-363. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.020

Buchman, A. s., Boyle, P. a., Wilson, R. s., Bienias, J. L., & Bennett, D. a. (2007). Physical activity and motor decline in older persons. *Muscle & Nerve*, *35*(3), 354-362. https://doi.org/10.1002/mus.20702

Bugaiska, A., Clarys, D., Jarry, C., Taconnat, 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. https://doi.org/10.1016/j.concog.2006.11.007

Bugg, J. M., & Head, D. (2011). Exercise moderates age-related atrophy of the medial temporal lobe. *Neurobiology of Aging*, *32*(3), 506-514. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2009.03.008

Bullock, A. M., Mizzi, A. L., Kovacevic, A., & Heisz, J. J. (2018). The Association of Aging and Aerobic Fitness With Memory. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *10*, 63. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00063

Bunce, D., & Murden, F. (2006). Age, aerobic fitness, executive function, and episodic memory. *European Journal of Cognitive Psychology*, *18*(2), 221-233. https://doi.org/10.1080/09541440540000185

Butler, K. M., Mcdaniel, M. A., Dornburg, C. C., Price, A. L., & Roediger, H. L. (2004). Age differences in veridical and false recall are not inevitable : The role of frontal lobe function. *Psychonomic Bulletin & Review*, *11*(5), 921-925. https://doi.org/10.3758/BF03196722

Canits, I., Pecher, D., & Zeelenberg, R. (2018). Effects of grasp compatibility on long-term memory for objects. *Acta Psychologica*, *182*, 65-74. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.11.009

Caspersen, C. J., Powell, K. E., & Christenson, G. M. (1985). *Physical Activity, Exercise, and Physical Fitness : Definitions and Distinctions for Health-Related Research*. 6.

Cassilhas, R. C., Viana, V. A. R., Grassmann, V., Santos, R. T., Santos, R. F., Tufik, S., & Mello, M. T. (2007). The Impact of Resistance Exercise on the Cognitive Function of the Elderly. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *39*(8), 1401-1407. https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318060111f

Chalabaev, A., Emile, M., Corrion, K., Stephan, Y., Clément-Guillotin, C., Pradier, C., & d'Arripe-Longueville, F. (2013). Development and Validation of the Aging Stereotypes and Exercise Scale. *Journal of Aging and Physical Activity*, *21*(3), 319-334. https://doi.org/10.1123/japa.21.3.319

Chalabaev, A., Palluel, E., & Ruchaud, F. (2020). "The threat is in the head, not in the legs" : Activating negative age stereotypes generates extra cognitive load during walking. *Psychology of Sport and Exercise*, *51*, 101740. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101740

Chan, A. S., Ho, Y., Cheung, M., Albert, M. S., Chiu, H. F. K., & Lam, L. C. W. (2005). Association Between Mind-Body and Cardiovascular Exercises and Memory in Older Adults : EXERCISE AND MEMORY. *Journal of the American Geriatrics Society*, *53*(10), 1754-1760. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53513.x

Chan, J. C. K., & McDermott, K. B. (2007). The effects of frontal lobe functioning and age on veridical and false recall. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*(4), 606-611. https://doi.org/10.3758/BF03196809

Chapman, S. B., Aslan, S., Spence, J. S., Defina, L. F., Keebler, M. W., Didehbani, N., & Lu, H. (2013). Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *5*, 75. https://doi.org/10.3389/fnagi.2013.00075

Chasteen, A. L., Bhattacharyya, S., Horhota, M., Tam, R., & Hasher, L. (2005). How Feelings of Stereotype Threat Influence Older Adults' Memory Performance. *Experimental Aging Research*, *31*(3), 235-260. https://doi.org/10.1080/03610730590948177

Cheng, W. L.-S., Ma, P. K., Lam, Y. Y., Ng, K. C., Ling, T. K., Yau, W. H., Chui, Y. W., Tsui, H. M., & Li, P. P. (2020). Effects of Senior Simulation Suit Programme on nursing students' attitudes towards older adults : A randomized controlled trial. *Nurse Education Today*, *88*, 104330. https://doi.org/10.1016/j.nedt.2020.104330

Cheval, B., Orsholits, D., Sieber, S., Courvoisier, D., Cullati, S., & Boisgontier, M. P. (2018). Cognitive resources explain the engagement in physical activity and its age-related decline : A longitudinal study of 105,206 people. *SportRxiv*. https://doi.org/10.31236/osf.io/pagx6

Chisolm, T. H., Willott, J. F., & Lister, J. J. (2003). The aging auditory system : Anatomic and physiologic changes and implications for rehabilitation. *International Journal of Audiology*, *42*(sup2), 3-10. https://doi.org/10.3109/14992020309074637

Chiviacowsky, S., Cardozo, P. L., & Chalabaev, A. (2018). Age stereotypes' effects on motor learning in older adults : The impact may not be immediate, but instead delayed. *Psychology of Sport and Exercise*, *36*, 209-212. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.02.012

Chodzko-Zajko, W. J. (1991). Physical fitness, cognitive performance, and aging. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *23*(7), 868.

Chodzko-Zajko, W. J., Schuler, P., Solomon, J., Heinl, B., & Ellis, N. R. (1992). The Influence of Physical Fitness on Automatic and Effortful Memory Changes in Aging. *The International Journal of Aging and Human Development*, *35*(4), 265-285. https://doi.org/10.2190/UJAQ-4LK5-2WAN-11DL

Clark, O. J. (2020). *How To Kill A Greek God—A Review, Critique, and Meta-Analysis of 14 years of Proteus Effect Research*. https://doi.org/10.31234/osf.io/9rbcs

Clarys, D., Bugaiska, A., Tapia, G., & Alexia Baudouin, and. (2009). Ageing, remembering, and executive function. *Memory*, *17*(2), 158-168. https://doi.org/10.1080/09658210802188301

Clarys, D., Isingrini, M., & Gana, K. (2002). Mediators of age-related differences in recollective experience in recognition memory. *Acta Psychologica*, *109*(3), 315-329. https://doi.org/10.1016/s0001-6918(01)00064-6

Clouston, S. A. P., Smith, D. M., Mukherjee, S., Zhang, Y., Hou, W., Link, B. G., & Richards, M. (2020). Education and Cognitive Decline : An Integrative Analysis of Global Longitudinal Studies of Cognitive Aging. *The Journals of Gerontology: Series B*, *75*(7), e151-e160. https://doi.org/10.1093/geronb/gbz053

Coelho, F. G. de M., Gobbi, S., Andreatto, C. A. A., Corazza, D. I., Pedroso, R. V., & Santos-Galduróz, R. F. (2013). Physical exercise modulates peripheral levels of brain-derived neurotrophic factor (BDNF) : A systematic review of experimental studies in the elderly. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *56*(1), 10-15. https://doi.org/10.1016/j.archger.2012.06.003

Coelho, F. M., Pereira, D. S., Lustosa, L. P., Silva, J. P., Dias, J. M. D., Dias, R. C. D., Queiroz, B. Z., Teixeira, A. L., Teixeira, M. M., & Pereira, L. S. M. (2012). Physical therapy intervention (PTI) increases plasma brain-derived neurotrophic factor (BDNF) levels in non-frail and pre-frail elderly women. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *54*(3), 415-420. https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.05.014

Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Raz, N., Webb, A. G., Cohen, N. J., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2003). Aerobic Fitness Reduces Brain Tissue Loss in Aging Humans. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *58*(2), M176-M180. https://doi.org/10.1093/gerona/58.2.M176

Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., Elavsky, S., Marquez, D. X., Hu, L., & Kramer, A. F. (2006). Aerobic Exercise Training Increases Brain Volume in Aging Humans. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *61*(11), 1166-1170. https://doi.org/10.1093/gerona/61.11.1166

Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., Webb, A., Jerome, G. J., Marquez, D. X., & Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(9), 3316-3321. https://doi.org/10.1073/pnas.0400266101

Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults : A Meta-Analytic Study. *Psychological Science*, *14*(2), 125-130. https://doi.org/10.1111/1467-9280.t01-1-01430

Collette, F., & Salmon, É. (2014). Fonctionnement exécutif et réseaux cérébraux. *Revue de neuropsychologie*, *6*(4), 256-266. https://doi.org/10.3917/rne.064.0256

Colombo, B., Piromalli, G., Pins, B., Taylor, C., & Fabio, R. A. (2020). The relationship between cognitive reserve and personality traits : A pilot study on a healthy aging Italian sample. *Aging Clinical and Experimental Research*, *32*(10), 2031-2040. https://doi.org/10.1007/s40520-019-01386-1

Correia, C., Lopez, K. J., Wroblewski, K. E., Huisingh-Scheetz, M., Kern, D. W., Chen, R. C., Schumm, L. P., Dale, W., McClintock, M. K., & Pinto, J. M. (2016). Global Sensory Impairment in Older Adults in the United States. *Journal of the American Geriatrics Society*, *64*(2), 306-313. https://doi.org/10.1111/jgs.13955

Corriveau Lecavalier, N., Ouellet, É., Boller, B., & Belleville, S. (2020). Use of immersive virtual reality to assess episodic memory : A validation study in older adults. *Neuropsychological Rehabilitation*, *30*(3), 462-480. https://doi.org/10.1080/09602011.2018.1477684

Cortese, M. J., Khanna, M. M., & Von Nordheim, D. (2019). Incidental memory for colour word associates processed in colour naming and reading aloud tasks : Is a blue *ocean* more memorable than a yellow one? *Memory*, *27*(7), 924-930. https://doi.org/10.1080/09658211.2019.1607877

Costello, M. C., & Bloesch, E. K. (2017). Are Older Adults Less Embodied? A Review of Age Effects through the Lens of Embodied Cognition. *Frontiers in Psychology*, *8*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00267

Craik, F. (1986). A functional account of age differences in memory. Human memory and cognitive capabilities : Mechanisms and performances. *Symposium in Memoriam*.

Craik, F. I. M. (1986). A functional account of age differences in memory. In *Human memory and cognitive capabilities, mechanisms and performances* (Elsevier, p. 409-422).

Craik, F. I. M. (1990). Changes in memory with normal aging : A functional view. *Advances in Neurology*, *51*: 201-205.

Craik, F. I. M. (2022). Reducing age-related Memory Deficits : The Roles of Environmental Support and self-initiated Processing Activities. *Experimental Aging Research*, 1-27. https://doi.org/10.1080/0361073X.2022.2084660

Craik, F. I. M., & McDowd, J. M. (1987). Age differences in recall and recognition. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 13(3), 474–479. https://doi.org/10.1037/0278-7393.13.3.474

Crawford, J. L., English, T., & Braver, T. S. (2022). *Incorporating Ecological Momentary Assessment into multi-method investigations of cognitive aging : Promise and practical considerations*.

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. https://doi.org/10.1076/anec.7.1.9.806

Crinière, L., Lhommet, C., Caille, A., Giraudeau, B., Lecomte, P., Couet, C., Oppert, J.-M., & Jacobi, D. (2011). Reproducibility and Validity of the French Version of the Long International Physical Activity Questionnaire in Patients With Type 2 Diabetes. *Journal of Physical Activity and Health*, *8*(6), 858-865. https://doi.org/10.1123/jpah.8.6.858

Cristofori, I., Cohen-Zimerman, S., & Grafman, J. (2019). Executive functions. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 163, p. 197-219). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2

Dai, C.-T., Chang, Y.-K., Huang, C.-J., & Hung, T.-M. (2013). Exercise mode and executive function in older adults : An ERP study of task-switching. *Brain and Cognition*, *83*(2), 153-162. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.07.007

Daly, M., McMinn, D., & Allan, J. L. (2015). A bidirectional relationship between physical activity and executive function in older adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.01044

Danckert, S. L., & Craik, F. I. M. (2013). Does aging affect recall more than recognition memory? *Psychology and Aging*, *28*(4), 902-909. https://doi.org/10.1037/a0033263

de Lima, D. B., Trapp, A., Corrêa, M. S., Giacobbo, B. L., de Lima Argimon, I. I., & Bromberg, E. (2019). Episodic memory boosting in older adults : Exploring the association of encoding strategies and physical activity. *Aging & Mental Health*, *23*(9), 1218-1226. https://doi.org/10.1080/13607863.2018.1481924

Dennis, N. A., & Cabeza, R. (2011). Neuroimaging of Healthy Cognitive Aging. In *The Handbook of Aging and Cognition*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203837665.ch1

Deshayes, M., Clément-Guillotin, C., Chorin, F., Guérin, O., & Zory, R. (2020). "Not performing worse but feeling older !" the negative effect of the induction of a negative aging stereotype. *Psychology of Sport and Exercise*, *51*, 101793. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101793

Deshayes, M., Zory, R., Radel, R., & Clément-Guillotin, C. (2022). Does the Effect of Stereotypes in Older People Depend Upon Task Intensity? *Research on Aging*, *44*(3-4), 254-264. https://doi.org/10.1177/01640275211020680

de Souto Barreto, P., Ferrandez, A.-M., & Saliba-Serre., B. (2011). Questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées (QAPPA) : Validation d'un nouvel instrument de mesure en langue française. *Science & Sports*, *26*(1), 11-18. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2010.09.006

Desrichard, O., & Köpetz, C. (2005). A threat in the elder : The impact of task-instructions, self-efficacy and performance expectations on memory performance in the elderly. *European Journal of Social Psychology*, *35*(4), 537-552. https://doi.org/10.1002/ejsp.249

de Vega, M., Dutriaux, L., Moreno, I. Z., García-Marco, E., Seigneuric, A., & Gyselinck, V. (2021). Crossing hands behind your back reduces recall of manual action sentences and alters brain dynamics. *Cortex*, *140*, 51-65. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.03.016

Devitt, A. L., & Schacter, D. L. (2016). False memories with age : Neural and cognitive underpinnings. *Neuropsychologia*, *91*, 346-359. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.08.030

Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, *64*(1), 135-168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

Díez-Álamo, A. M., Díez, E., Alonso, M. A., & Fernandez, A. (2019). Absence of posture-dependent and posture-congruent memory effects on the recall of action sentences. *PLOS ONE*, *14*(12), e0226297. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226297

Dijksterhuis, A., Spears, R., & Lépinasse, V. (2001). Reflecting and Deflecting Stereotypes : Assimilation and Contrast in Impression Formation and Automatic Behavior. *Journal of Experimental Social Psychology*, *37*(4), 286-299. https://doi.org/10.1006/jesp.2000.1449

Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, *102*(1), 139-149. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009

Dijkstra, K., & Post, L. (2015). Mechanisms of embodiment. *Frontiers in Psychology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01525

Dixon, R. A., Hultsch, D. F., & Hertzog, C. (1988). The Metamemory in Adulthood (MIA) questionnaire. *Psychopharmacology Bulletin*, *24*(4), 671-688.

Dorgnier, R., Picard, L., & Mazerolle, M. (2022). Vieillissement et distorsions de mémoire : L'impact des stéréotypes du vieillissement: *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement*, *20*(3), 341-348. https://doi.org/10.1684/pnv.2022.1048

Dupraz, L., Barra, J., Beaudoin, M., & Guerraz, M. (2022). Impact of an overweight body representation in virtual reality on locomotion in a motor imagery task. *Psychological Research*. 2023;87(2):462-473. https://doi.org/10.1007/s00426-022-01675-x

Dupuy, O., Gauthier, C. J., Fraser, S. A., Desjardins-Crèpeau, L., Desjardins, M., Mekary, S., Lesage, F., Hoge, R. D., Pouliot, P., & Bherer, L. (2015). Higher levels of cardiovascular fitness are associated with better executive function and prefrontal oxygenation in younger and older women. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2015.00066

Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016a). Cognition incarnée : Un point de vue sur les représentations spatiales. *L'Année psychologique*, *116*(03), 419-465. https://doi.org/10.4074/S0003503316000373

Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016b). Learning Is Better with the Hands Free : The Role of Posture in the Memory of Manipulable Objects. *PLOS ONE*, *11*(7), e0159108. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159108

Dutriaux, L., Nicolas, S., & Gyselinck, V. (2021). Aging and posture in the memory of manipulable objects. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *28*(1), 26-36. https://doi.org/10.1080/13825585.2019.1708252

Eich, T. S., Murayama, K., Castel, A. D., & Knowlton, B. J. (2014). The dynamic effects of age-related stereotype threat on explicit and implicit memory performance in older adults. *Social Cognition*, *32*, 559-570. https://doi.org/10.1521/soco.2014.32.6.559

Emile, M., Chalabaev, A., Stephan, Y., Corrion, K., & d'Arripe-Longueville, F. (2014). Aging stereotypes and active lifestyle : Personal correlates of stereotype internalization and relationships with level of physical activity among older adults. *Psychology of Sport and Exercise*, *15*(2), 198-204. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2013.11.002

Engeroff, T., Ingmann, T., & Banzer, W. (2018). Physical Activity Throughout the Adult Life Span and Domain-Specific Cognitive Function in Old Age : A Systematic Review of Cross-Sectional and Longitudinal Data. *Sports Medicine*, *48*(6), 1405-1436. https://doi.org/10.1007/s40279-018-0920-6

Erickson, K. I., Gildengers, A. G., & Butters, M. A. (2013). Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *15*(1), 99-108. https://doi.org/10.31887/DCNS.2013.15.1/kerickson

Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S., White, S. M., Wójcicki, T. R., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2009). Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*, *19*(10), 1030-1039. https://doi.org/10.1002/hipo.20547

Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kim, J. S., Heo, S., Alves, H., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., Vieira, V. J., Martin, S. A., Pence, B. D., Woods, J. A., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 3017-3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

Ertel, K. A., Glymour, M. M., & Berkman, L. F. (2008). Effects of Social Integration on Preserving Memory Function in a Nationally Representative US Elderly Population. *American Journal of Public Health*, *98*(7), 1215-1220. https://doi.org/10.2105/AJPH.2007.113654

Esiri, M. M., & Chance, S. A. (2012). Cognitive reserve, cortical plasticity and resistance to Alzheimer's disease. *Alzheimer's Research & Therapy*, *4*(2), 7. https://doi.org/10.1186/alzrt105

Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Reviews*, *52*(1), 119-130. https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.01.002

Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., & Nowell, P. (1997). The Influence of Physical Fitness and Exercise upon Cognitive Functioning : A Meta-Analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *19*(3), 249-277. https://doi.org/10.1123/jsep.19.3.249

Eymard, A. S., Crawford, B. D., & Keller, T. M. (2010). "Take a Walk in My Shoes" : Nursing Students Take a Walk in Older Adults' Shoes to Increase Knowledge and Empathy. *Geriatric Nursing*, *31*(2), 137-141. https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2010.02.008

Fabre, C., Chamari, K., Mucci, P., Massé-Biron, J., & Préfaut, C. (2002). Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. *International Journal of Sports Medicine*, *23*(6), 415-421. https://doi.org/10.1055/s-2002-33735

Fernández-Ballesteros, R., Bustillos, A., & Huici, C. (2015). Positive Perception of Aging and Performance in a Memory Task : Compensating for Stereotype Threat? *Experimental aging research*, *41*, 410-425. https://doi.org/10.1080/0361073X.2015.1053757

Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-Related Impairment in Executive Functioning : Updating, Inhibition, Shifting, and Access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *26*(7), 874-890. https://doi.org/10.1080/13803390490510680

Flöel, A., Ruscheweyh, R., Krüger, K., Willemer, C., Winter, B., Völker, K., Lohmann, H., Zitzmann, M., Mooren, F., Breitenstein, C., & Knecht, S. (2010). Physical activity and memory functions : Are neurotrophins and cerebral gray matter volume the missing link? *NeuroImage*, *49*(3), 2756-2763. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.043

Follenfant, A., Légal, J.-B., Dinard, F. M. D., & Meyer, T. (2005). Effet de l'activation de stéréotypes sur le comportement : Une application en contexte sportif. *European Review of Applied Psychology / Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, *55*(2), 121. https://doi.org/10.1016/j.erap.2005.02.002

Foubert-Samier, A., Catheline, G., Amieva, H., Dilharreguy, B., Helmer, C., Allard, M., & Dartigues, J.-F. (2012). Education, occupation, leisure activities, and brain reserve : A population-based study. *Neurobiology of Aging*, *33*(2), 423.e15-423.e25. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.09.023

Fox, J., Bailenson, J. N., & Tricase, L. (2013). The embodiment of sexualized virtual selves : The Proteus effect and experiences of self-objectification via avatars. *Computers in Human Behavior*, *29*(3), 930-938. https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.027

Fraundorf, S. H., Hourihan, K. L., Peters, R. A., & Benjamin, A. S. (2019). Aging and recognition memory : A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *145*(4), 339-371. https://doi.org/10.1037/bul0000185

Frederiksen, K. S., Verdelho, A., Madureira, S., Bäzner, H., O'Brien, J. T., Fazekas, F., Scheltens, P., Schmidt, R., Wallin, A., Wahlund, L.-O., Erkinjunttii, T., Poggesi, A., Pantoni, L., Inzitari, D., Waldemar, G., & on behalf of the LADIS Study. (2015). Physical activity in the elderly is associated with improved executive function and processing speed : The LADIS Study: Physical activity and cognitive function. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *30*(7), 744-750. https://doi.org/10.1002/gps.4220

Fresson, M., Dardenne, B., Geurten, M., & Meulemans, T. (2017). [Formula : See text]The effect of stereotype threat on older people's clinical cognitive outcomes: investigating the moderating role of dementia worry. *The Clinical Neuropsychologist*, *31*(8), 1306-1328. https://doi.org/10.1080/13854046.2017.1307456

Frick, A., Wright, H. R., Fay, S., Vanneste, S., Angel, L., Bouazzaoui, B., & Taconnat, L. (2022). The protective effect of educational level varies as a function of the difficulty of the memory task in ageing. *European Journal of Ageing*, *19*(4), 1407-1415. https://doi.org/10.1007/s10433-022-00724-z

Frison, A.-K., Aigner, L., Wintersberger, P., & Riener, A. (2018). Who is Generation A? : Investigating the Experience of Automated Driving for Different Age Groups. *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 94-104. https://doi.org/10.1145/3239060.3239087

Froger, C., Bouazzaoui, B., Isingrini, M., & Taconnat, L. (2012). Study time allocation deficit of older adults : The role of environmental support at encoding? *Psychology and Aging*, *27*, 577-588. https://doi.org/10.1037/a0026358

Froger, C., Taconnat, L., Landré, L., Beigneux, K., & Isingrini, M. (2009). Effects of level of processing at encoding and types of retrieval task in mild cognitive impairment and normal aging. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31*(3), 312-321. https://doi.org/10.1080/13803390802112554

Gaggioli, A., Settimi, C., Cipresso, P., Pedroli, E., Stramba-Badiale, M., & Riva, G. (2018). Using an Aging Simulator Suit for Modeling Visuo-Motor Limitations of Elderly Users Interacting with a Mobile Application : Feasibility Study. In P. Cipresso, S. Serino, Y. Ostrovsky, & J. T. Baker (Éds.), *Pervasive Computing Paradigms for Mental Health* (Vol. 253, p. 24-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01093-5_4

Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2015). Long-term habitual physical activity is associated with lower distractibility in a Stroop interference task in aging : Behavioral and ERP evidence. *Brain and Cognition*, *98*, 87-101. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.06.004

Gajewski, P. D., Golka, K., Hengstler, J. G., Kadhum, T., Digutsch, J., Genç, E., Wascher, E., & Getzmann, S. (2023). Does physical fitness affect cognitive functions differently across adulthood? An advantage of being older. *Frontiers in Psychology*, *14*, 1134770. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1134770

Gauthier, K., Morand, A., Mazerolle, M., Rigalleau, F., Eustache, F., Desgranges, B., Huguet, P., & Régner, I. (2020). Stereotype threat effect : Historical context, mechanisms, and impact on cognitive performance in older adults. *Revue de neuropsychologie*, 12, 351-357. https://doi.org/10.1684/nrp.2020.0608

Gautier, R., Pinard, F., Vanneste, S., Fay, S., Bouazzaoui, B., & Taconnat, L. (2022). Aging, memory performance and metacognitive beliefs : A narrative review. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement*, *20*(4), 497-505. https://doi.org/10.1684/pnv.2022.1070

Gazes, Y., Lee, S., Fang, Z., Mensing, A., Noofoory, D., Hidalgo Nazario, G., Babukutty, R., Chen, B. B., Habeck, C., & Stern, Y. (2023). Effects of Brain Maintenance and Cognitive Reserve on Age-Related Decline in Three Cognitive Abilities. *The Journals of Gerontology: Series B*, *78*(8), 1284-1293. https://doi.org/10.1093/geronb/gbad044

Gilet, A.-L., Evrard, C., Galharret, J.-M., & Colombel, F. (2021). The Moderating Role of Education on the Relationship Between Perceived Stereotype Threat and False Memory in Aging. *Frontiers in Psychology*, *11*, 606249. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.606249

Godde, B., & Voelcker-Rehage, C. (2017). Cognitive Resources Necessary for Motor Control in Older Adults Are Reduced by Walking and Coordination Training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00156

Gong, H., Sun, L., Yang, R., Pang, J., Chen, B., Qi, R., Gu, X., Zhang, Y., & Zhang, T.-M. (2019). Changes of upright body posture in the sagittal plane of men and women occurring with aging—A cross sectional study. *BMC Geriatrics*, *19*(1), 71. https://doi.org/10.1186/s12877-019-1096-0

Groom, V., Bailenson, J. N., & Nass, C. (2009). The influence of racial embodiment on racial bias in immersive virtual environments. *Social Influence*, *4*(3), 231-248. https://doi.org/10.1080/15534510802643750

Grossniklaus, H. E., Nickerson, J. M., Edelhauser, H. F., Bergman, L. A. M. K., & Berglin, L. (2013). Anatomic Alterations in Aging and Age-Related Diseases of the Eye. *Investigative Opthalmology & Visual Science*, *54*(14), ORSF23. https://doi.org/10.1167/iovs.13-12711

Groza, H. L., Sebesi, S. B., & Mandru, D. S. (2017). Age Simulation Suits for Training, Research and Development. In *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology; 12th—15th October 2016, Cluj-Napoca, Romania* (Vol. 59, p. 77-80). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52875-5_17

Grundy, E. M., & Murphy, M. (2018). Population ageing in Europe. In *Oxford Textbook of Geriatric Medicine* (3rd edition, p. 11-17). Oxford University Press.

Gu, Q., Zou, L., Loprinzi, P. D., Quan, M., & Huang, T. (2019). Effects of Open Versus Closed Skill Exercise on Cognitive Function : A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, 10. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.01707

Guerrero-Sastoque, L., Bouazzaoui, B., Burger, L., Froger, C., Isingrini, M., & Taconnat, L. (2019). Optimizing memory strategy use in young and older adults : The role of metamemory and internal strategy use. *Acta Psychologica*, *192*, 73-86. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.11.002

Guerrero-Sastoque, L., Isingrini, M., Angel, L., Fay, S., Taconnat, L., & Bouazzaoui, B. (2021). Effect of self-reported internal memory strategy use on age-related episodic and working memory decline : Contribution of control processes. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *75*(4), 348-361. https://doi.org/10.1037/cep0000240

Guiney, H., Lucas, S. J., Cotter, J. D., & Machado, L. (2015). Evidence cerebral blood-flow regulation mediates exercise–cognition links in healthy young adults. *Neuropsychology*, *29*, 1-9. https://doi.org/10.1037/neu0000124

Guralnik, J. M., Simonsick, E. M., Ferrucci, L., Glynn, R. J., Berkman, L. F., Blazer, D. G., Scherr, P. A., & Wallace, R. B. (1994). A short physical performance battery assessing lower extremity function : Association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. *Journal of Gerontology*, *49*(2), M85-94. https://doi.org/10.1093/geronj/49.2.m85

Gürdere, C., Strobach, T., Pastore, M., & Pfeffer, I. (2023). Do executive functions predict physical activity behavior? A meta-analysis. *BMC Psychology*, *11*(1), 33. https://doi.org/10.1186/s40359-023-01067-9

Gussekloo, J., de Craen, A. J. M., Oduber, C., van Boxtel, M. P. J., & Westendorp, R. G. J. (2005). Sensory Impairment and Cognitive Functioning in Oldest-Old Subjects : The Leiden 85+ Study. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, *13*(9), 781-786. https://doi.org/10.1097/00019442-200509000-00006

Hall, C. D., Smith, A. L., & Keele, S. W. (2001). The impact of aerobic activity on cognitive function in older adults : A new synthesis based on the concept of executive control. *European Journal of Cognitive Psychology*, *13*(1-2), 279-300. https://doi.org/10.1080/09541440126012

Hall, P. A., & Fong, G. T. (2015). Temporal self-regulation theory : A neurobiologically informed model for physical activity behavior. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00117

Hamer, M., Muniz Terrera, G., & Demakakos, P. (2018). Physical activity and trajectories in cognitive function : English Longitudinal Study of Ageing. *Journal of Epidemiology and Community Health*, *72*(6), 477-483. https://doi.org/10.1136/jech-2017-210228

Harkins, S. G. (2006). Mere effort as the mediator of the evaluation-performance relationship. *Journal of Personality and Social Psychology*, *91*(3), 436-455. https://doi.org/10.1037/0022-3514.91.3.436

Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic Representation of Action Words in Human Motor and Premotor Cortex. *Neuron*, *41*(2), 301-307. https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00838-9

Hausdorff, J. M., Levy, B. R., & Wei, J. Y. (1999). The power of ageism on physical function of older persons : Reversibility of age-related gait changes. *Journal of the American Geriatrics Society*, *47*(11), 1346-1349. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1999.tb07437.x

Hausdorff, J. M., Yogev, G., Springer, S., Simon, E. S., & Giladi, N. (2005). Walking is more like catching than tapping : Gait in the elderly as a complex cognitive task. *Experimental Brain Research*, *164*(4), 541-548. https://doi.org/10.1007/s00221-005-2280-3

Hawco, C., Berlim, M. T., & Lepage, M. (2013). The Dorsolateral Prefrontal Cortex Plays a Role in Self-Initiated Elaborative Cognitive Processing during Episodic Memory Encoding : rTMS Evidence. *PLOS ONE*, *8*(9), e73789. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073789

Hayes, S. M., Alosco, M. L., Hayes, J. P., Cadden, M., Peterson, K. M., Allsup, K., Forman, D. E., Sperling, R. A., & Verfaellie, M. (2015). Physical Activity Is Positively Associated with Episodic Memory in Aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *21*(10), 780-790. https://doi.org/10.1017/S1355617715000910

Head, D., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Raz, N. (2008). Neuroanatomical and cognitive mediators of age-related differences in episodic memory. *Neuropsychology*, *22*(4), 491-507. https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.4.491

Hershfield, H. E., Goldstein, D. G., Sharpe, W. F., Fox, J., Yeykelis, L., Carstensen, L. L., & Bailenson, J. N. (2011). Increasing Saving Behavior Through Age-Progressed Renderings of the Future Self. *Journal of Marketing Research*, *48*(SPL), S23-S37. https://doi.org/10.1509/jmkr.48.SPL.S23

Hess, T. M., Auman, C., Colcombe, S. J., & Rahhal, T. A. (2003). The Impact of Stereotype Threat on Age Differences in Memory Performance. *The Journals of Gerontology: Series B*, *58*(1), P3-P11. https://doi.org/10.1093/geronb/58.1.P3

Hess, T. M., Emery, L., & Queen, T. L. (2009). Task demands moderate stereotype threat effects on memory performance. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, *64*(4), 482-486. https://doi.org/10.1093/geronb/gbp044

Hess, T. M., & Hinson, J. T. (2006). Age-related variation in the influences of aging stereotypes on memory in adulthood. *Psychology and Aging*, *21*, 621-625. https://doi.org/10.1037/0882-7974.21.3.621

Hess, T. M., Hinson, J. T., & Hodges, E. A. (2009). Moderators of and Mechanisms Underlying Stereotype Threat Effects on Older Adults' Memory Performance. *Experimental Aging Research*, *35*(2), 153-177. https://doi.org/10.1080/03610730802716413

Hillman, C. H., Motl, R. W., Pontifex, M. B., Posthuma, D., Stubbe, J. H., Boomsma, D. I., & de Geus, E. J. C. (2006). Physical activity and cognitive function in a cross-section of younger and older community-dwelling individuals. *Health Psychology*, *25*(6), 678-687. https://doi.org/10.1037/0278-6133.25.6.678

Hodges, N. A., Suarez-Martinez, A. D., & Murfee, W. L. (2018). Understanding angiogenesis during aging : Opportunities for discoveries and new models. *Journal of Applied Physiology*, *125*(6), 1843-1850. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00112.2018

Hofer, S. M., Berg, S., & Era, P. (2003). Evaluating the interdependence of aging-related changes in visual and auditory acuity, balance, and cognitive functioning. *Psychology and Aging*, *18*(2), 285-305. https://doi.org/10.1037/0882-7974.18.2.285

Horton, S., Baker, J., Pearce, W., & Deakin, J. M. (2010). Immunity to Popular Stereotypes of Aging? Seniors and Stereotype Threat. *Educational Gerontology*, *36*(5), 353-371. https://doi.org/10.1080/03601270903323976

Hsu, H.-C., Lee, C. Y., & Lee, C. H. (2016). *Effects of Aging Simulation Program on Nurses' Attitudes and Willingness toward Elder Care*. *11*(2), 105-115.

Huang, C.-J., Lin, P.-C., Hung, C.-L., Chang, Y.-K., & Hung, T.-M. (2014). Type of physical exercise and inhibitory function in older adults : An event-related potential study. *Psychology of Sport and Exercise*, *15*(2), 205-211. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2013.11.005

Huang, T., Larsen, K. T., Ried-Larsen, M., Møller, N. C., & Andersen, L. B. (2014). The effects of physical activity and exercise on brain-derived neurotrophic factor in healthy humans : A review: Physical activity and BDNF. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *24*(1), 1-10. https://doi.org/10.1111/sms.12069

Humes, L. E., Busey, T. A., Craig, J., & Kewley-Port, D. (2013). Are age-related changes in cognitive function driven by age-related changes in sensory processing? *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*(3), 508-524. https://doi.org/10.3758/s13414-012-0406-9

Hummert, M. L. (2011). Chapter 16—Age Stereotypes and Aging. In K. W. Schaie & S. L. Willis (Éds.), *Handbook of the Psychology of Aging (Seventh Edition)* (p. 249-262). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380882-0.00016-4

Hyodo, K., Dan, I., Kyutoku, Y., Suwabe, K., Byun, K., Ochi, G., Kato, M., & Soya, H. (2016). The association between aerobic fitness and cognitive function in older men mediated by frontal lateralization. *NeuroImage*, *125*, 291-300. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.062

Idowu, M. I., & Szameitat, A. J. (2023). Executive function abilities in cognitively healthy young and older adults—A cross-sectional study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *15*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2023.976915

Ingold, M., Tulliani, N., Chan, C. C. H., & Liu, K. P. Y. (2020). Cognitive function of older adults engaging in physical activity. *BMC Geriatrics*, *20*(1), 229. https://doi.org/10.1186/s12877-020-01620-w

Isaev, N. K., Stelmashook, E. V., & Genrikhs, E. E. (2019). Neurogenesis and brain aging. *Reviews in the Neurosciences*, *30*(6), 573-580. https://doi.org/10.1515/revneuro-2018-0084

Isingrini, M., Fontaine, R., Taconnat, L., & Duportal, A. (1995). Aging and Encoding in Memory : False Alarms and Decision Criteria in a Word-Pair Recognition Task. *The International Journal of Aging and Human Development*, *41*(1), 79-88. https://doi.org/10.2190/ERDG-LHA8-EBYN-L9LX

Isingrini, M., & Taconnat, L. (2008). Mémoire épisodique, fonctionnement frontal et vieillissement Episodic memory, frontal functioning, and aging. *Revue neurologique*, 164 Suppl 3, S91–S95. https://doi.org/10.1016/S0035-3787(08)73297-1.

Jacoby, L. L., Bishara, A. J., Hessels, S., & Toth, J. P. (2005). Aging, Subjective Experience, and Cognitive Control : Dramatic False Remembering by Older Adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, *134*(2), 131-148. https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.2.131

Jacoby, L. L., & Rhodes, M. G. (2006). False Remembering in the Aged. *Current Directions in Psychological Science*, *15*(2), 49-53. https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00405.x

James, B. D., Boyle, P. A., Bennett, D. A., & Buchman, A. S. (2012). Total Daily Activity Measured With Actigraphy and Motor Function in Community-Dwelling Older Persons With and Without Dementia. *Alzheimer disease and associated disorders*, *26*(3), 238-245. https://doi.org/10.1097/WAD.0b013e31822fc3cb

Jeong, H., & Kwon, H. (2021). Long-term effects of an aging suit experience on nursing college students. *Nurse Education in Practice*, *50*, 102923. https://doi.org/10.1016/j.nepr.2020.102923

Jones, S., Nyberg, L., Sandblom, J., Stigsdotter Neely, A., Ingvar, M., Magnus Petersson, K., & Bäckman, L. (2006). Cognitive and neural plasticity in aging : General and task-specific limitations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *30*(6), 864-871. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.012

Jonker, C., Geerlings, M. I., & Schmand, B. (2000). Are memory complaints predictive for dementia? A review of clinical and population-based studies. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *15*(11), 983-991. https://doi.org/10.1002/1099-1166(200011)15:11<983::aid-gps238>3.0.co;2-5

Kachouri, H., Fay, S., Angel, L., & Isingrini, M. (2022). Influence of current physical exercise on the relationship between aging and episodic memory and fluid intelligence. *Acta Psychologica*, *227*, 103609. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103609

Kalenzaga, S., Clarys, D., & Piolino, P. (2019). Effortful memory processes under stereotype threat and self-concept in aging. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*(7), 1876-1887. https://doi.org/10.1177/1747021818819787

Kelly, M. E., Loughrey, D., Lawlor, B. A., Robertson, I. H., Walsh, C., & Brennan, S. (2014). The impact of exercise on the cognitive functioning of healthy older adults : A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, *16*, 12-31. https://doi.org/10.1016/j.arr.2014.05.002

Kenshalo, D. R. (1986). Somesthetic sensitivity in young and elderly humans. *Journal of Gerontology*, *41*(6), 732-742. https://doi.org/10.1093/geronj/41.6.732

Kirchhoff, B. A., Gordon, B. A., & Head, D. (2014). Prefrontal gray matter volume mediates age effects on memory strategies. *NeuroImage*, *90*, 326-334. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.052

Klimova, B., & Dostalova, R. (2020). The Impact of Physical Activities on Cognitive Performance among Healthy Older Individuals. *Brain Sciences*, *10*(6), 377. https://doi.org/10.3390/brainsci10060377

Kocur, M., Kloss, M., Schwind, V., Wolff, C., & Henze, N. (2020). Flexing Muscles in Virtual Reality : Effects of Avatars' Muscular Appearance on Physical Performance. *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 193-205. https://doi.org/10.1145/3410404.3414261

Koen, J. D., & Yonelinas, A. P. (2014). The Effects of Healthy Aging, Amnestic Mild Cognitive Impairment, and Alzheimer's Disease on Recollection and Familiarity : A Meta-Analytic Review. *Neuropsychology Review*, *24*(3), 332-354. https://doi.org/10.1007/s11065-014-9266-5

Körner, A., Topolinski, S., & Strack, F. (2015). Routes to embodiment. *Frontiers in Psychology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00940

Kovacevic, A., Fenesi, B., Paolucci, E., & Heisz, J. J. (2020). The effects of aerobic exercise intensity on memory in older adults. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *45*(6), 591-600. https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0495

Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banich, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R., Chason, J., Vakil, E., Bardell, L., Boileau, R. A., & Colcombe, A. (1999). Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature*, *400*(6743), Article 6743. https://doi.org/10.1038/22682

Kriska, A. M., Sandler, R. B., Cauley, J. A., Laporte, R. E., Hom, D. L., & Pambianco, G. (1988). The assessment of historical physical activity and its relation to adult bone parameters. *American Journal of Epidemiology*, *127*(5), 1053-1063. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114881

Kukolja, J., Thiel, C. M., Wilms, M., Mirzazade, S., & Fink, G. R. (2009). Ageing-related changes of neural activity associated with spatial contextual memory. *Neurobiology of Aging*, *30*(4), 630-645. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2007.08.015

La Voie, D., & Light, L. L. (1994). *Adult Age Differences in Repetition Priming : A Meta-Analysis*.

Lafenetre, P., Leske, O., Wahle, P., & Heumann, R. (2011). The beneficial effects of physical activity on impaired adult neurogenesis and cognitive performance. *Frontiers in Neuroscience*, *5*, 51. https://doi.org/10.3389/fnins.2011.00051

Lamont, R. A., Swift, H. J., & Abrams, D. (2015). A review and meta-analysis of age-based stereotype threat : Negative stereotypes, not facts, do the damage. *Psychology and Aging*, *30*(1), 180-193. https://doi.org/10.1037/a0038586

Lauenroth, A., Schulze, S., Ioannidis, A., Simm, A., & Schwesig, R. (2017). Effect of an Age Simulation Suit on Younger Adults' Gait Performance Compared to Older Adults' Normal Gait. *Research in Gerontological Nursing*, *10*(5), 227-233. https://doi.org/10.3928/19404921-20170831-04

Launay, A., Baudouin, A., Vanneste, S., & Taconnat, L. (soumis). Mémoire épisodique et maladie d'Alzheimer : évolution des théories et des outils d'évaluation clinique. Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement

Laurentius, T., Quandel, J., Bollheimer, L. C., Leonhardt, S., Ngo, C., & Lüken, M. (2022). Spatiotemporal gait parameters in young individuals wearing an age simulation suit compared to healthy older individuals. *European Review of Aging and Physical Activity*, *19*(1), 29. https://doi.org/10.1186/s11556-022-00298-w

Lautenschlager, N. T., Cox, K., & Cyarto, E. V. (2012). The influence of exercise on brain aging and dementia. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, *1822*(3), 474-481. https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2011.07.010

Lavallière, M., D'Ambrosio, L., Gennis, A., Burstein, A., Godfrey, K. M., Waerstad, H., Puleo, R. M., Lauenroth, A., & Coughlin, J. F. (2017). Walking a mile in another's shoes : The impact of wearing an Age Suit. *Gerontology & Geriatrics Education*, *38*(2), 171-187. https://doi.org/10.1080/02701960.2015.1079706

Lee, J.-E. R., Nass, C. I., & Bailenson, J. N. (2014). Does the Mask Govern the Mind? : Effects of Arbitrary Gender Representation on Quantitative Task Performance in Avatar-Represented Virtual Groups. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *17*(4), 248-254. https://doi.org/10.1089/cyber.2013.0358

Lee, S. W. H., & Teh, P.-L. (2020). "Suiting Up" to Enhance Empathy Toward Aging : A Randomized Controlled Study. *Frontiers in Public Health*, *8*, 376. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00376

Lee, S. Y., Kang, J. M., Kim, D. J., Woo, S. K., Lee, J.-Y., & Cho, S.-J. (2020). Cognitive Reserve, Leisure Activity, and Neuropsychological Profile in the Early Stage of Cognitive Decline. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *12*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2020.590607

Legault, C., Jennings, J. M., Katula, J. A., Dagenbach, D., Gaussoin, S. A., Sink, K. M., Rapp, S. R., Rejeski, W. J., Shumaker, S. A., Espeland, M. A., & SHARP-P Study Group. (2011). Designing clinical trials for assessing the effects of cognitive training and physical activity interventions on cognitive outcomes : The Seniors Health and Activity Research Program Pilot (SHARP-P) study, a randomized controlled trial. *BMC Geriatrics*, *11*, 27. https://doi.org/10.1186/1471-2318-11-27

Levin, O., Netz, Y., & Ziv, G. (2017). The beneficial effects of different types of exercise interventions on motor and cognitive functions in older age : A systematic review. *European Review of Aging and Physical Activity*, *14*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s11556-017-0189-z

Levy, B., Ashman, O., & Dror, I. (2000). To be or Not to be : The Effects of Aging Stereotypes on the Will to Live. *OMEGA - Journal of Death and Dying*, *40*(3), 409-420. https://doi.org/10.2190/Y2GE-BVYQ-NF0E-83VR

Levy, B. R. (2003). Mind Matters : Cognitive and Physical Effects of Aging Self-Stereotypes. *The Journals of Gerontology: Series B*, *58*(4), P203-P211. https://doi.org/10.1093/geronb/58.4.P203

Levy, B. R., Chung, P. H., Bedford, T., & Navrazhina, K. (2014). Facebook as a Site for Negative Age Stereotypes. *The Gerontologist*, *54*(2), 172-176. https://doi.org/10.1093/geront/gns194

Levy, B. R., & Leifheit-Limson, E. (2009). The stereotype-matching effect : Greater influence on functioning when age stereotypes correspond to outcomes. *Psychology and Aging*, *24*(1), 230-233. https://doi.org/10.1037/a0014563

Li, S.-C., Jordanova, M., & Lindenberger, U. (1998). From good senses to good sense : A link between tactile information processing and intelligence. *Intelligence*, *26*(2), 99-122. https://doi.org/10.1016/S0160-2896(99)80057-9

Lin, F. R. (2011). Hearing Loss and Cognition Among Older Adults in the United States. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *66A*(10), 1131-1136. https://doi.org/10.1093/gerona/glr115

Lin, F. R., Yaffe, K., Xia, J., Xue, Q.-L., Harris, T. B., Purchase-Helzner, E., Satterfield, S., Ayonayon, H. N., Ferrucci, L., Simonsick, E. M., & Health ABC Study Group, for the. (2013). Hearing Loss and Cognitive Decline in Older Adults. *JAMA Internal Medicine*, *173*(4), 293. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2013.1868

Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1994). *Sensory Functioning and Intelligence in Old Age : A Strong Connection*. *Psychology and aging*, 9(3), 339–355. https://doi.org/10.1037//0882-7974.9.3.339

Lineweaver, T. T., Kugler, J., Rabellino, A., & Stephan, Y. (2018). Beliefs about age-related changes in physical functioning across the adult life span and their relationship with physical activity levels of older adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *25*(4), 613-631. https://doi.org/10.1080/13825585.2017.1356903

Liu-Ambrose, T. (2010). Resistance Training and Executive Functions : A 12-Month Randomized Controlled Trial. *Archives of Internal Medicine*, *170*(2), 170. https://doi.org/10.1001/archinternmed.2009.494

Loprinzi, P. D., Blough, J., Crawford, L., Ryu, S., Zou, L., & Li, H. (2019). The Temporal Effects of Acute Exercise on Episodic Memory Function : Systematic Review with Meta-Analysis. *Brain Sciences*, *9*(4), 87. https://doi.org/10.3390/brainsci9040087

Luo, L., & Craik, F. I. (2008). Aging and Memory : A Cognitive Approach. *The Canadian Journal of Psychiatry*, *53*(6), 346-353. https://doi.org/10.1177/070674370805300603

Maass, A., Düzel, S., Goerke, M., Becke, A., Sobieray, U., Neumann, K., Lövden, M., Lindenberger, U., Bäckman, L., Braun-Dullaeus, R., Ahrens, D., Heinze, H.-J., Müller, N. G., & Düzel, E. (2015). Vascular hippocampal plasticity after aerobic exercise in older adults. *Molecular Psychiatry*, *20*(5), 585-593. https://doi.org/10.1038/mp.2014.114

Mandolesi, L., Polverino, A., Montuori, S., Foti, F., Ferraioli, G., Sorrentino, P., & Sorrentino, G. (2018). Effects of Physical Exercise on Cognitive Functioning and Wellbeing : Biological and Psychological Benefits. *Frontiers in Psychology*, *9*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00509

Marmeleira, J. (2013). An examination of the mechanisms underlying the effects of physical activity on brain and cognition : A review with implications for research. *European Review of Aging and Physical Activity*, *10*(2), 83-94. https://doi.org/10.1007/s11556-012-0105-5

Marquet, M., Boutaayamou, M., Schwartz, C., Locquet, M., Bruyère, O., Croisier, J.-L., & Adam, S. (2018). Does negative information about aging influence older adults' physical performance and subjective age? *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *78*, 181-189. https://doi.org/10.1016/j.archger.2018.06.013

Martin, A., Haxby, J. V., Lalonde, F. o. M., Wiggs, C. L., & Ungerleider, L. G. (1995). Discrete Cortical Regions Associated with Knowledge of Color and Knowledge of Action. *Science*, *270*(5233), 102-105. https://doi.org/10.1126/science.270.5233.102

Martin, A., Wiggs, C. L., Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature*, *379*(6566), 649-652. https://doi.org/10.1038/379649a0

Mazerolle, M., Régner, I., Morisset, P., Rigalleau, F., & Huguet, P. (2012). Stereotype threat strengthens automatic recall and undermines controlled processes in older adults. *Psychological Science*, *23*(7), 723-727. https://doi.org/10.1177/0956797612437607

Mazerolle, M., Régner, I., Rigalleau, F., & Huguet, P. (2015). Stereotype Threat Alters the Subjective Experience of Memory. *Experimental Psychology*, *62*(6), 395-402. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000303

Mazerolle, M., Smith, A. M., Torrance, M., & Thomas, A. K. (2021). Understanding Older Adults' Memory Distortion in the Light of Stereotype Threat. *Frontiers in Psychology*, *12*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.628696

McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., & Balota, D. A. (2009). Aging reduces veridical remembering but increases false remembering : Neuropsychological test correlates of remember–know judgments. *Neuropsychologia*, *47*(11), 2164-2173. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.025

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*(2), 267-280. https://doi.org/10.1037/0096-1523.14.2.267

McMorris, T. (2016). Chronic exercise and cognition in humans : A review of the evidence for a neurochemical basis. In *Exercise-cognition interaction : Neuroscience perspectives* (In T. McMorris (Ed.), p. 167-186). Elsevier Academic Press.

Meteyard, L., Cuadrado, S. R., Bahrami, B., & Vigliocco, G. (2012). Coming of age : A review of embodiment and the neuroscience of semantics. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *48*(7), 788-804. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.11.002

Meugnot, A., Almecija, Y., & Toussaint, L. (2014). The embodied nature of motor imagery processes highlighted by short-term limb immobilization. *Experimental Psychology*, *61*(3), 180-186. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000237

Mille, J., Brambati, S. M., Izaute, M., & Vallet, G. T. (2021). Low-Resolution Neurocognitive Aging and Cognition : An Embodied Perspective. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *15*, 687393. https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.687393

Mille, J., Izaute, M., & Vallet, G. T. (2023). Liens entre le déclin sensoriel et cognitif dans le vieillissement normal : Revue critique de la littérature et apports de l'approche incarnée et située de la cognition. *Psychologie Française*, *68*(1), 71-90. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2022.06.001

Mitchell, K. J., & Johnson, M. K. (2009). Source monitoring 15 years later : What have we learned from fMRI about the neural mechanisms of source memory? *Psychological Bulletin*, *135*(4), 638-677. https://doi.org/10.1037/a0015849

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions : Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 8-14. https://doi.org/10.1177/0963721411429458

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks : A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

Moisello, C., Bove, M., Huber, R., Abbruzzese, G., Battaglia, F., Tononi, G., & Ghilardi, M. F. (2008). Short-Term Limb Immobilization Affects Motor Performance. *Journal of Motor Behavior*, *40*(2), 165-176. https://doi.org/10.3200/JMBR.40.2.165-176

Mollo, G., Pulvermüller, F., & Hauk, O. (2016). Movement priming of EEG/MEG brain responses for action-words characterizes the link between language and action. *Cortex*, *74*, 262-276. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021

Mondon, K., Naudin, M., Beaufils, É., & Atanasova, B. (2014). Perception of taste and smell in normal and pathological aging : An update. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Viellissement*, *12*(3), 313-320. https://doi.org/10.1684/pnv.2014.0484

Moore, D. R., Edmondson-Jones, M., Dawes, P., Fortnum, H., McCormack, A., Pierzycki, R. H., & Munro, K. J. (2014). Relation between Speech-in-Noise Threshold, Hearing Loss and Cognition from 40–69 Years of Age. *PLoS ONE*, *9*(9), e107720. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107720

Mooruth (2021). Validation d'un programme de stimulation sensori-motrice face aux situations de handicap émergentes lors du vieillissement. [Thèse de doctorat, Université Paul-Valéry Montpellier] https://theses.hal.science/tel-03697435/file/2021_MOORUTH_arch.pdf

Moriello, G., Cotter, J. J., Shook, N., Dodd-McCue, D., & Welleford, E. A. (2013). The Effect of Implicit Stereotypes on the Physical Performance of Older Adults. *Educational Gerontology*, *39*(8), 599-612. https://doi.org/10.1080/03601277.2012.704241

Moscovitch, M., & Winocur, G. (2002). The Frontal Cortex and Working with Memory. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Éds.), *Principles of Frontal Lobe Function* (p. 188-209). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0012

Moutoussamy, I., Pothier, K., Toussaint, L., Keroum, S., & Laurence Taconnat (soumis). The impact of mentioning aging on motor performance of younger adults wearing an aging suit. *Experimental Aging Research*

Moutoussamy, I., Taconnat, L., Angel, L., Pothier, K., Toussaint, L., & Fay, S. (en révision). Protective effects of physical activity on episodic memory during aging are explained by executive functioning. *European Review of Aging and Physical Activity*

Moutoussamy, I., Taconnat, L., Pothier, K., Toussaint, L., & Fay, S. (2022). Episodic memory and aging : Benefits of physical activity depend on the executive resources required for the task. *PLOS ONE*, *17*(2), e0263919. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263919

Netz, Y., Dwolatzky, T., Zinker, Y., Argov, E., & Agmon, R. (2011). Aerobic fitness and multidomain cognitive function in advanced age. *International Psychogeriatrics*, *23*(1), 114-124. https://doi.org/10.1017/S1041610210000797

Netz, Y., Wu, M.-J., Becker, B. J., & Tenenbaum, G. (2005). Physical activity and psychological well-being in advanced age : A meta-analysis of intervention studies. *Psychology and Aging*, *20*(2), 272-284. https://doi.org/10.1037/0882-7974.20.2.272

Nilsson, L.-G. (2003). Memory function in normal aging : Memory function in normal aging. *Acta Neurologica Scandinavica*, *107*, 7-13. https://doi.org/10.1034/j.1600-0404.107.s179.5.x

Nithianantharajah, J., & Hannan, A. J. (2009). The neurobiology of brain and cognitive reserve : Mental and physical activity as modulators of brain disorders. *Progress in Neurobiology*, *89*(4), 369-382. https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2009.10.001

Northey, J. M., Cherbuin, N., Pumpa, K. L., Smee, D. J., & Rattray, B. (2018). Exercise interventions for cognitive function in adults older than 50 : A systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *52*(3), 154-160. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096587

Nouchi, R., Taki, Y., Takeuchi, H., Sekiguchi, A., Hashizume, H., Nozawa, T., Nouchi, H., & Kawashima, R. (2014). Four weeks of combination exercise training improved executive functions, episodic memory, and processing speed in healthy elderly people : Evidence from a randomized controlled trial. *AGE*, *36*(2), 787-799. https://doi.org/10.1007/s11357-013-9588-x

Nyberg, L., Lövdén, M., Riklund, K., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2012). Memory aging and brain maintenance. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(5), 292-305. https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.04.005

Oken, B. S., Zajdel, D., Kishiyama, S., Flegal, K., Dehen, C., Haas, M., Kraemer, D. F., Lawrence, J., & Leyva, J. (2006). Randomized, controlled, six-month trial of yoga in healthy seniors : Effects on cognition and quality of life. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, *12*(1), 40-47.

Ono, Y., Iwayama, K., Tanaka, E., Ashida, T., & Komasa, Y. (2017). Learning effects of aging simulation-based training Analysis using text mining. *Journal of Osaka Dental University*, *51*(2), 5. https://doi.org/10.18905/jodu.51.2_131

Ouellet, É., Boller, B., Corriveau-Lecavalier, N., Cloutier, S., & Belleville, S. (2018). The Virtual Shop : A new immersive virtual reality environment and scenario for the assessment of everyday memory. *Journal of Neuroscience Methods*, *303*, 126-135. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2018.03.010

Paivio, A., & Csapo, K. (1973). Picture superiority in free recall : Imagery or dual coding? *Cognitive Psychology*, *5*(2), 176-206. https://doi.org/10.1016/0010-0285(73)90032-7

Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M., & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Consciousness and Cognition*, *22*(3), 779-787. https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.04.016

Petrides, M. (2002). The Mid-ventrolateral Prefrontal Cortex and Active Mnemonic Retrieval. *Neurobiology of Learning and Memory*, *78*(3), 528-538. https://doi.org/10.1006/nlme.2002.4107

Pettigrew, C., & Soldan, A. (2019). Defining Cognitive Reserve and Implications for Cognitive Aging. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, *19*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s11910-019-0917-z

Piggin, J. (2020). What Is Physical Activity? A Holistic Definition for Teachers, Researchers and Policy Makers. *Frontiers in Sports and Active Living*, *2*, 72. https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00072

Ponce, P., & Loprinzi, P. D. (2018). A bi-directional model of exercise and episodic memory function. *Medical Hypotheses*, *117*, 3-6. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2018.05.020

Popham, L. E., & Hess, T. M. (2015). Age differences in the underlying mechanisms of stereotype threat effects. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, *70*(2), 225-234. https://doi.org/10.1093/geronb/gbt093

Prakash, R. S., Voss, M. W., Erickson, K. I., Lewis, J. M., Chaddock, L., Malkowski, E., Alves, H., Kim, J., Szabo, A., White, S. M., Wójcicki, T. R., Klamm, E. L., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2011). Cardiorespiratory Fitness and Attentional Control in the Aging Brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 229. https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00229

Pulvermüller, F., Hauk, O., Nikulin, V. V., & Ilmoniemi, R. J. (2005). Functional links between motor and language systems : Functional links between motor and language systems. *European Journal of Neuroscience*, *21*(3), 793-797. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.03900.x

Quigley, A., MacKay-Lyons, M., & Eskes, G. (2020). Effects of Exercise on Cognitive Performance in Older Adults : A Narrative Review of the Evidence, Possible Biological Mechanisms, and Recommendations for Exercise Prescription. *Journal of Aging Research*, *2020*, 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/1407896

Rahhal, T. A., Colcombe, S. J., & Hasher, L. (2001). Instructional manipulations and age differences in memory : Now you see them, now you don't. *Psychology and Aging*, *16*(4), 697-706. https://doi.org/10.1037//0882-7974.16.4.697

Rahhal, T. A., May, C. P., & Hasher, L. (2002). Truth and Character : Sources That Older Adults Can Remember. *Psychological Science*, *13*(2), 101-105. https://doi.org/10.1111/1467-9280.00419

Ratan, R., Beyea, D., Li, B. J., & Graciano, L. (2020). Avatar characteristics induce users' behavioral conformity with small-to-medium effect sizes : A meta-analysis of the proteus effect. *Media Psychology*, *23*(5), 651-675. https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1623698

Ratey, J. J., & Loehr, J. E. (2011). The positive impact of physical activity on cognition during adulthood : A review of underlying mechanisms, evidence and recommendations. *Reviews in the Neurosciences*, *22*(2). https://doi.org/10.1515/rns.2011.017

Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance : Integration of structural and functional findings. *2nd ed. Mahwah, N: Lawrence Erlbaum Associates;*, *2*.

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*(11), 1676-1689. https://doi.org/10.1093/cercor/bhi044

Reinhard, R., Shah, K. G., Faust-Christmann, C. A., & Lachmann, T. (2020). Acting your avatar's age : Effects of virtual reality avatar embodiment on real life walking speed. *Media Psychology*, *23*(2), 293-315. https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1598435

Repetto, C., Cipresso, P., & Riva, G. (2015). Virtual action and real action have different impacts on comprehension of concrete verbs. *Frontiers in Psychology*, *6*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2015.00176

Repetto, C., Serino, S., Macedonia, M., & Riva, G. (2016). Virtual Reality as an Embodied Tool to Enhance Episodic Memory in Elderly. *Frontiers in Psychology*, *7*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01839

Reuter-Lorenz, P. A., Festini, S. B., & Jantz, T. K. (2016). Executive Functions and Neurocognitive Aging. In *Handbook of the Psychology of Aging* (p. 245-262). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411469-2.00013-3

Rey, A. E., Riou, B., Vallet, G. T., & Versace, R. (2017). The automatic visual simulation of words : A memory reactivated mask slows down conceptual access. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *71*(1), 14-22. https://doi.org/10.1037/cep0000100

Rhodes, S., Greene, N. R., & Naveh-Benjamin, M. (2019). Age-related differences in recall and recognition : A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(5), 1529-1547. https://doi.org/10.3758/s13423-019-01649-y

Rikli, R., & Jones, J. (1999). Development and validation of a functional fitness test for a community-residing adults. *Journal of Aging and Physical Activity*, *7*(2), 129-161. https://doi.org/10.1123/japa.7.2.129

Rivière, F., Widad, F. Z., Speyer, E., Erpelding, M.-L., Escalon, H., & Vuillemin, A. (2018). Reliability and validity of the French version of the global physical activity questionnaire. *Journal of Sport and Health Science*, *7*(3), 339-345. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.08.004

Robert, H., Casillas, J., Iskandar, M., Dathis, P., Antoine, D., Taha, S., Didier, V., Scaglioni, G., Caillaux, B., & Vanhoecke, J. (2004). Le Score d'activité physique de Dijon : Reproductibilité et corrélations avec l'aptitude physique de sujets sains âgés. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, *47*(8), 546-554. https://doi.org/10.1016/S0168-6054(04)00175-8

Roberts, K. L., & Allen, H. A. (2016). Perception and Cognition in the Ageing Brain : A Brief Review of the Short- and Long-Term Links between Perceptual and Cognitive Decline. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00039

Robitaille, A., Muniz, G., Lindwall, M., Piccinin, A. M., Hoffman, L., Johansson, B., & Hofer, S. M. (2014). Physical activity and cognitive functioning in the oldest old : Within- and between-person cognitive activity and psychosocial mediators. *European Journal of Ageing*, *11*(4), 333-347. https://doi.org/10.1007/s10433-014-0314-z

Roll, J.-P. (2003). 1.1. Physiologie de la kinesthèse. La proprioception musculaire : Sixième sens, ou sens premier ? *Intellectica*, *36*(1), 49-66. https://doi.org/10.3406/intel.2003.1676

Ruscheweyh, R., Deppe, M., Lohmann, H., Wersching, H., Korsukewitz, C., Duning, T., Bluhm, S., Stehling, C., Keller, S. S., & Knecht, S. (2013). Executive performance is related to regional gray matter volume in healthy older individuals : Gray Matter Volume and Executive Functions. *Human Brain Mapping*, *34*(12), 3333-3346. https://doi.org/10.1002/hbm.22146

Ruscheweyh, R., Willemer, C., Krüger, K., Duning, T., Warnecke, T., Sommer, J., Völker, K., Ho, H. V., Mooren, F., Knecht, S., & Flöel, A. (2011). Physical activity and memory functions : An interventional study. *Neurobiology of Aging*, *32*(7), 1304-1319. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2009.08.001

Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, *103*(3), 403-428. https://doi.org/10.1037/0033-295x.103.3.403

Salvi, S. M. (2006). Ageing changes in the eye. *Postgraduate Medical Journal*, *82*(971), 581-587. https://doi.org/10.1136/pgmj.2005.040857

Salzman, T., Dupuy, O., & Fraser, S. A. (2022). Effects of Cardiorespiratory Fitness on Cerebral Oxygenation in Healthy Adults : A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, *13*, 838450. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.838450

Sanders, L. M. J., Hortobágyi, T., la Bastide-van Gemert, S., van der Zee, E. A., & van Heuvelen, M. J. G. (2019). Dose-response relationship between exercise and cognitive function in older adults with and without cognitive impairment : A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, *14*(1), e0210036. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210036

Sari, D., Taskiran, N., Baysal, E., Acar, E., & Cevik Akyil, R. (2020). Effect of an aged simulation suit on nursing students' attitudes and empathy. *European Geriatric Medicine*, *11*(4), 667-675. https://doi.org/10.1007/s41999-020-00316-z

Sarid, O., Melzer, I., Kurz, I., Shahar, D. R., & Ruch, W. (2010). The Effect of Helping Behavior and Physical Activity on Mood States and Depressive Symptoms of Elderly People. *Clinical Gerontologist*, *33*(4), 270-282. https://doi.org/10.1080/07317115.2010.502105

Sauzeon, H., N'Kaoua, B., Lespinet, V., Guillem, F., & Claverie, B. (2000). Age Effect in Recall Performance According to the Levels of Processing, Elaboration, and Retrieval Cues. *Experimental Aging Research*, *26*(1), 57-73. https://doi.org/10.1080/036107300243687

Schaefer, S., Bill, D., Hoor, M., & Vieweg, J. (2022). The influence of age and age simulation on task-difficulty choices in motor tasks. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 1-26. https://doi.org/10.1080/13825585.2022.2043232

Scherf, C. (2014). *Entwicklung, Herstellung und Evaluation des Modularen Alterssimulationsanzugs eXtra (MAX)*. Universitätsverlag Chemnitz.

Schmader, T., Johns, M., & Forbes, C. (2008). An integrated process model of stereotype threat effects on performance. *Psychological Review*, *115*, 336-356. https://doi.org/10.1037/0033-295X.115.2.336

Schmidt, D. F., & Boland, S. M. (1986). Structure of perceptions of older adults : Evidence for multiple stereotypes. *Psychology and Aging*, *1*, 255-260. https://doi.org/10.1037/0882-7974.1.3.255

Schmidt, L. I., Schlomann, A., Gerhardy, T., & Wahl, H.-W. (2022). "Aging Means to Me… That I Feel Lonely More Often"? An Experimental Study on the Effects of Age Simulation Regarding Views on Aging. *Frontiers in Psychology*, *13*, 806233. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.806233

Schmidt, S. C. E., Tittlbach, S., Bös, K., & Woll, A. (2017). Different Types of Physical Activity and Fitness and Health in Adults : An 18-Year Longitudinal Study. *BioMed Research International*, *2017*, 1-10. https://doi.org/10.1155/2017/1785217

Schofield, P. W. (2003). The brain reserve hypothesis. In *The Ageing Brain*. CRC Press.

Seibt, B., & Förster, J. (2004). Stereotype threat and performance : How self-stereotypes influence processing by inducing regulatory foci. *Journal of Personality and Social Psychology*, *87*(1), 38-56. https://doi.org/10.1037/0022-3514.87.1.38

Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y., & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging : Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(5), 721-733. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005

Sigmundsson, H., Lorås, H., & Haga, M. (2016). Assessment of Motor Competence Across the Life Span : Aspects of Reliability and Validity of a New Test Battery. *SAGE Open*, *6*(1), 215824401663327. https://doi.org/10.1177/2158244016633273

Simmons, W. K., Martin, A., & Barsalou, L. W. (2005). Pictures of Appetizing Foods Activate Gustatory Cortices for Taste and Reward. *Cerebral Cortex*, *15*(10), 1602-1608. https://doi.org/10.1093/cercor/bhi038

Simons, J. S., Graham, K. S., & Hodges, J. R. (2002). Perceptual and semantic contributions to episodic memory : Evidence from semantic dementia and Alzheimer's disease. *Journal of Memory and Language*, *47*(2), 197-213. https://doi.org/10.1016/S0749-596X(02)00003-7

Skedung, L., El Rawadi, C., Arvidsson, M., Farcet, C., Luengo, G. S., Breton, L., & Rutland, M. W. (2018). Mechanisms of tactile sensory deterioration amongst the elderly. *Scientific Reports*, *8*(1), 5303. https://doi.org/10.1038/s41598-018-23688-6

Smith, A. M., Gallo, D. A., Barber, S. J., Maddox, K. B., & Thomas, A. K. (2017). Stereotypes, Warnings, and Identity-Related Variables Influence Older Adults' Susceptibility to Associative False Memory Errors. *The Gerontologist*, *57*(suppl_2), S206-S215. https://doi.org/10.1093/geront/gnx057

Smith, P. J., Blumenthal, J. A., Hoffman, B. M., Cooper, H., Strauman, T. A., Welsh-Bohmer, K., Browndyke, J. N., & Sherwood, A. (2010). Aerobic Exercise and Neurocognitive Performance :

A Meta-Analytic Review of Randomized Controlled Trials. *Psychosomatic Medicine*, *72*(3), 239-252. https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3181d14633

Song, S., Stern, Y., & Gu, Y. (2022). Modifiable lifestyle factors and cognitive reserve : A systematic review of current evidence. *Ageing Research Reviews*, *74*, 101551. https://doi.org/10.1016/j.arr.2021.101551

Spreng, R. N., Shoemaker, L., & Turner, G. R. (2017). Executive Functions and Neurocognitive Aging. In *Executive Functions in Health and Disease* (p. 169-196). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803676-1.00008-8

Steele, C. M. (1997). A threat in the air. How stereotypes shape intellectual identity and performance. *The American Psychologist*, *52*(6), 613-629. https://doi.org/10.1037//0003-066x.52.6.613

Steele, C. M., & Aronson, J. (1995). Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans. *Journal of Personality and Social Psychology*, *69*, 797-811. https://doi.org/10.1037/0022-3514.69.5.797

Stein, R., Blanchard-Fields, F., & Hertzog, C. (2002). The Effects of Age-Stereotype Priming on the Memory Performance of Older Adults. *Experimental Aging Research*, *28*(2), 169-181. https://doi.org/10.1080/03610730252800184

Stern, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *8*(3), 448-460. https://doi.org/10.1017/S1355617702813248

Stern, Y., Albert, M., Barnes, C. A., Cabeza, R., Pascual-Leone, A., & Rapp, P. R. (2023). A framework for concepts of reserve and resilience in aging. *Neurobiology of Aging*, *124*, 100-103. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2022.10.015

Stern, Y., Arenaza-Urquijo, E. M., Bartrés-Faz, D., Belleville, S., Cantilon, M., Chetelat, G., Ewers, M., Franzmeier, N., Kempermann, G., Kremen, W. S., Okonkwo, O., Scarmeas, N., Soldan, A., Udeh-Momoh, C., Valenzuela, M., Vemuri, P., Vuoksimaa, E., & the Reserve, Resilience and Protective Factors PIA Empirical Definitions and Conceptual Frameworks Workgroup. (2020). Whitepaper : Defining and investigating cognitive reserve, brain reserve, and brain maintenance. *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*, *16*(9), 1305-1311. https://doi.org/10.1016/j.jalz.2018.07.219

Stern, Y., Barnes, C. A., Grady, C., Jones, R. N., & Raz, N. (2019). Brain Reserve, Cognitive Reserve, Compensation, and Maintenance : Operationalization, Validity, and Mechanisms of Cognitive Resilience. *Neurobiology of aging*, *83*, 124-129. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2019.03.022

Stillman, C. M., Cohen, J., Lehman, M. E., & Erickson, K. I. (2016). Mediators of Physical Activity on Neurocognitive Function : A Review at Multiple Levels of Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 626. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00626

Stranahan, A. M., Lee, K., & Mattson, M. P. (2008). Central Mechanisms of HPA Axis Regulation by Voluntary Exercise. *NeuroMolecular Medicine*, *10*(2), 118-127. https://doi.org/10.1007/s12017-008-8027-0

Stuss, D., & Craik, F. (2019). *Alterations in Executive Functions with Aging* (p. 168-187). https://doi.org/10.1017/9781108554350.012

Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1987). The Frontal Lobes and Control of Cognition and Memory. In *The Frontal Lobes Revisited*. Psychology Press.

Swift, H. J., Lamont, R. A., & Abrams, D. (2012). Are they half as strong as they used to be? An experiment testing whether age-related social comparisons impair older people's hand grip strength and persistence. *BMJ Open*, *2*(3), e001064. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001064

Taconnat, L., Baudouin, A., Fay, S., Clarys, D., Vanneste, S., Tournelle, L., & Isingrini, M. (2006). Aging and implementation of encoding strategies in the generation of rhymes : The role of executive functions. *Neuropsychology*, *20*(6), 658-665. https://doi.org/10.1037/0894-4105.20.6.658

Taconnat, L., Clarys, D., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., & Isingrini, M. (2007). Aging and strategic retrieval in a cued-recall test : The role of executive functions and fluid intelligence. *Brain and Cognition*, *64*(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.09.011

Taconnat, L., & Isingrini, M. (2004). Cognitive Operations in the Generation Effect on a Recall Test : Role of Aging and Divided Attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*, 827-837. https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.4.827

Taconnat, L., & Lemaire, P. (2014). Executive functions, cognitive aging and strategic variations. *Psychologie Française*, 59(1), 89–100. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2013.03.007

Taconnat, L., Pinard, F., Vanneste, S., Bouazzaoui, B., Fay, S., Martinez, L., Alibran, E., & Geraci, L. (2022). Personality traits affect older adults' memory differently depending on the environmental support provided at encoding. *Personality and Individual Differences*, *191*, 111572. https://doi.org/10.1016/j.paid.2022.111572

Taconnat, L., Raz, N., Toczé, C., Bouazzaoui, B., Sauzéon, H., Fay, S., & Isingrini, M. (2009). Ageing and organisation strategies in free recall : The role of cognitive flexibility. *European Journal of Cognitive Psychology*, *21*(2-3), 347-365. https://doi.org/10.1080/09541440802296413

Taconnat, L., & Rémy, P. (2006). Les faux souvenirs dans le vieillissement normal : Données empiriques et modèles théoriques. *L'Année psychologique*, *106*(03), 457. https://doi.org/10.4074/S0003503306003071

Tammy Lin, J.-H., & Wu, D.-Y. (2021). Exercising With Embodied Young Avatars : How Young vs. Older Avatars in Virtual Reality Affect Perceived Exertion and Physical Activity Among Male and Female Elderly Individuals. *Frontiers in Psychology*, *12*, 693545. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.693545

Tannenbaum, C. (2005). Older women's health priorities and perceptions of care delivery : Results of the WOW health survey. *Canadian Medical Association Journal*, *173*(2), 153-159. https://doi.org/10.1503/cmaj.050059

Taşoz, Ş. M., & Afacan, Y. (2022). Simulated physical ageing : A prioritized persona-based model for accessible interiors in senior housing environments. *Indoor and Built Environment*, *31*(8), 2115-2133. https://doi.org/10.1177/1420326X20952817

Thomas, A. K., & Dubois, S. J. (2011). Reducing the Burden of Stereotype Threat Eliminates Age Differences in Memory Distortion. *Psychological Science*, *22*(12), 1515-1517. https://doi.org/10.1177/0956797611425932

Toussaint, L., Bidet-Ildei, C., Scotto, C., & Badets, A. (2023). Effects of short-term hand immobilization on anticipatory mechanism for tool use. *Psychological Research*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s00426-023-01824-w

Toussaint, L., & Meugnot, A. (2013). Short-term limb immobilization affects cognitive motor processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*(2), 623-632. https://doi.org/10.1037/a0028942

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*(1), 45-53. https://doi.org/10.1080/09289919408251449

Tucker, A. M., & Stern, Y. (2014). Cognitive Reserve and the Aging Brain. In *Geriatric Neurology* (p. 118-125). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118730676.ch5

Tullo, E. StC., Spencer, J., & Allan, L. (2010). Systematic Review : Helping the Young to Understand the Old. Teaching Interventions in Geriatrics to Improve the Knowledge, Skills, and Attitudes of Undergraduate Medical Students: teaching interventions in geriatrics. *Journal of the American Geriatrics Society*, *58*(10), 1987-1993. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2010.03072.x

Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In *Organization of memory* (p. xiii, 423-xiii, 423). Academic Press.

Tulving, E. (1983). *Elements of Episodic Memory*. Oxford University Press.

Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology*, *26*(1), 1-12. http://dx.doi.org/10.1037/h0080017

Tulving, E. (1995). Organization of memory : Quo vadis? In *The cognitive neurosciences* (p. 839-853). The MIT Press.

Tulving, E. (2001). Episodic memory and common sense : How far apart? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *356*(1413), 1505-1515. https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0937

Tulving, E. (2002). Episodic Memory : From Mind to Brain. *Annual Review of Psychology*, *53*(1), 1-25. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135114

Turner, G. R., & Spreng, R. N. (2012). Executive functions and neurocognitive aging : Dissociable patterns of brain activity. *Neurobiology of Aging*, *33*(4), 826.e1-13. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2011.06.005

Vahle, N., & Tomasik, M. J. (2022). The Embodiment of an Older Avatar in a Virtual Reality Setting Impacts the Social Motivation of Young Adults. *Experimental Aging Research*, *48*(2), 164-176. https://doi.org/10.1080/0361073X.2021.1943793

Valentijn, S. A. M., Van Boxtel, M. P. J., Van Hooren, S. A. H., Bosma, H., Beckers, H. J. M., Ponds, R. W. H. M., & Jolles, J. (2005). Change in Sensory Functioning Predicts Change in Cognitive Functioning : Results from a 6-Year Follow-Up in the Maastricht Aging Study: sensory function and cognitive change. *Journal of the American Geriatrics Society*, *53*(3), 374-380. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53152.x

Vallet, G., Brunel, L., & Versace, R. (2010). The perceptual nature of the cross-modal priming effect : Arguments in favor of a sensory-based conception of memory. *Experimental Psychology*, *57*(5), 376-382. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000045

Vallet, G., Simard, M., & Versace, R. (2011). Sensory-dependent knowledge in young and elderly adults : Arguments from the cross-modal priming effect. *Current Aging Science*, *4*(2), 137-149. https://doi.org/10.2174/1874609811104020137

Vallet, G. T. (2015). Embodied cognition of aging. *Frontiers in Psychology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00463

Vallet, G. T., Hudon, C., Bier, N., Macoir, J., Versace, R., & Simard, M. (2017). A SEMantic and EPisodic Memory Test (SEMEP) Developed within the Embodied Cognition Framework : Application to Normal Aging, Alzheimer's Disease and Semantic Dementia. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1493. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01493

Vallet, G. T., Simard, M., Versace, R., & Mazza, S. (2013). The perceptual nature of audiovisual interactions for semantic knowledge in young and elderly adults. *Acta Psychologica*, *143*(3), 253-260. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.04.009

van Dam, W. O., Rueschemeyer, S.-A., & Bekkering, H. (2010). How specifically are action verbs represented in the neural motor system : An fMRI study. *NeuroImage*, *53*(4), 1318-1325. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.071

Vanhees, L., Lefevre, J., Philippaerts, R., Martens, M., Huygens, W., Troosters, T., & Beunen, G. (2005). How to assess physical activity? How to assess physical fitness? *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation: Official Journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology*, *12*(2), 102-114. https://doi.org/10.1097/01.hjr.0000161551.73095.9c

VanSwearingen, J. M., & Studenski, S. A. (2014). Aging, Motor Skill, and the Energy Cost of Walking : Implications for the Prevention and Treatment of Mobility Decline in Older Persons. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *69*(11), 1429-1436. https://doi.org/10.1093/gerona/glu153

Varela F. J., Rosch E., Thompson E. (1992). The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience. Cambridge: MIT press.

Vauclair, C.-M., Borges Rodrigues, R., Marques, S., Esteves, C. S., Cunha, F., & Gerardo, F. (2018). Doddering but dear … even in the eyes of young children? Age stereotyping and prejudice in childhood and adolescence. *International Journal of Psychology*, *53*(S1), 63-70. https://doi.org/10.1002/ijop.12430

Verrillo, R. T. (1980). Age related changes in the sensitivity to vibration. *Journal of Gerontology*, *35*(2), 185-193. https://doi.org/10.1093/geronj/35.2.185

Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée : Une cognition située et projetée* (Mardaga).

Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-In : An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, *26*(3), 280-306. https://doi.org/10.1080/20445911.2014.892113

Vieweg, J., Panzer, S., & Schaefer, S. (2023). Effects of age simulation and age on motor sequence learning : Interaction of age-related cognitive and motor decline. *Human Movement Science*, *87*, 103025. https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.103025

Vieweg, J., & Schaefer, S. (2020). How an Age Simulation Suit affects Motor and Cognitive Performance and Self-perception in Younger Adults. *Experimental Aging Research*, *46*(4), 273-290. https://doi.org/10.1080/0361073X.2020.1766299

Villatte, J., Taconnat, L., Bidet-Ildei, C., & Toussaint, L. (2021). Short-term upper limb immobilization and the embodied view of memory : A pilot study. *PLOS ONE*, *16*(3), e0248239. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248239

Villatte, J., Taconnat, L., Bidet-Ildei, C., & Toussaint, L. (2022). The role of implicit motor simulation on action verb memory. *Psychological Research*, *87*(2), 441-451. https://doi.org/10.1007/s00426-022-01671-1

Vivar, C., Potter, M. C., & van Praag, H. (2012). All About Running : Synaptic Plasticity, Growth Factors and Adult Hippocampal Neurogenesis. In C. Belzung & P. Wigmore (Éds.), *Neurogenesis and Neural Plasticity* (Vol. 15, p. 189-210). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/7854_2012_220

Voelcker-Rehage, C., Godde, B., & Staudinger, U. M. (2010). Physical and motor fitness are both related to cognition in old age. *European Journal of Neuroscience*, *31*(1), 167-176. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.07014.x

Voelcker-Rehage, C., & Niemann, C. (2013). Structural and functional brain changes related to different types of physical activity across the life span. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(9), 2268-2295. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.028

Voss, M. W., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Chaddock, L., Kim, J. S., Alves, H., Szabo, A., Phillips, S. M., Wójcicki, T. R., Mailey, E. L., Olson, E. A., Gothe, N., Vieira-Potter, V. J., Martin, S. A., Pence, B. D., Cook, M. D., Woods, J. A., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2013). Neurobiological markers of exercise-related brain plasticity in older adults. *Brain, Behavior, and Immunity*, *28*, 90-99. https://doi.org/10.1016/j.bbi.2012.10.021

Vuillemin, A., Oppert, J. M., Guillemin, F., Essermeant, L., Fontvieille, A. M., Galan, P., Kriska, A. M., & Hercberg, S. (2000). Self-administered questionnaire compared with interview to assess past-year physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *32*(6), 1119-1124. https://doi.org/10.1097/00005768-200006000-00013

Vuillemin, A., Speyer, E., Simon, C., Ainsworth, B., & Paineau, D. (2012). Revue critique des questionnaires d'activité physique administrés en population française et perspectives de développement. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, *47*(5), 234-241. https://doi.org/10.1016/j.cnd.2012.04.002

Wang, W.-C., Daselaar, S. M., & Cabeza, R. (2017). Episodic Memory Decline and Healthy Aging ☆. In *Learning and Memory : A Comprehensive Reference* (p. 475-497). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809324-5.21093-6

Wechsler, D. (1945). *Wechsler memory scale*. Psychological Corporation.

Weinstein, A. M., Voss, M. W., Prakash, R. S., Chaddock, L., Szabo, A., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., McAuley, E., Kramer, A. F., & Erickson, K. I. (2012). The association between aerobic fitness and executive function is mediated by prefrontal cortex volume. *Brain, Behavior, and Immunity*, *26*(5), 811-819. https://doi.org/10.1016/j.bbi.2011.11.008

Weiss, D. (2016). On the Inevitability of Aging : Essentialist Beliefs Moderate the Impact of Negative Age Stereotypes on Older Adults' Memory Performance and Physiological Reactivity. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, gbw087. https://doi.org/10.1093/geronb/gbw087

West, R. (1996). An Application of Prefrontal Cortex Function Theory to Cognitive Aging. *Psychological Bulletin*, *120*(2), 272-292.

West, R. (2000). In defense of the frontal lobe hypothesis of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *6*(6), 727-729.

Whalley, L. J., Deary, I. J., Appleton, C. L., & Starr, J. M. (2004). Cognitive reserve and the neurobiology of cognitive aging. *Ageing Research Reviews*, *3*(4), 369-382. https://doi.org/10.1016/j.arr.2004.05.001

Wheeler, M. A., Stuss, D. T., & Tulving, E. (1995). Frontal lobe damage produces episodic memory impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *1*(6), 525-536. https://doi.org/10.1017/S1355617700000655

Wheeler, M. A., Stuss, D. T., & Tulving, E. (1997). Toward a theory of episodic memory : The frontal lobes and autonoetic consciousness. *Psychological Bulletin*, *121*(3), 331-354. https://doi.org/10.1037/0033-2909.121.3.331

Whiteman, A. S., Young, D. E., He, X., Chen, T. C., Wagenaar, R. C., Stern, C. E., & Schon, K. (2014). Interaction between serum BDNF and aerobic fitness predicts recognition memory in healthy young adults. *Behavioural Brain Research*, *259*, 302-312. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.11.023

Wickremaratchi, M. M. (2006). Effects of ageing on touch. *Postgraduate Medical Journal*, *82*(967), 301-304. https://doi.org/10.1136/pgmj.2005.039651

Wilbur, J., Marquez, D. X., Fogg, L., Wilson, R. S., Staffileno, B. A., Hoyem, R. L., Morris, M. C., Bustamante, E. E., & Manning, A. F. (2012). The Relationship Between Physical Activity and Cognition in Older Latinos. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *67*(5), 525-534. https://doi.org/10.1093/geronb/gbr137

Wilckens, K. A., Erickson, K. I., & Wheeler, M. E. (2018). Physical activity and cognition : A mediating role of efficient sleep. *Behavioral Sleep Medicine*, *16*, 569-586. https://doi.org/10.1080/15402002.2016.1253013

Willems, R. M., Labruna, L., D'Esposito, M., Ivry, R., & Casasanto, D. (2011). A Functional Role for the Motor System in Language Understanding : Evidence From Theta-Burst Transcranial Magnetic Stimulation. *Psychological Science*, *22*(7), 849-854. https://doi.org/10.1177/0956797611412387

Wong, J. T., & Gallo, D. A. (2019). Activating Aging Stereotypes Increases Source Recollection Confusions in Older Adults : Effect at Encoding but Not Retrieval. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, *74*(4), 633-641. https://doi.org/10.1093/geronb/gbx103

Woo, E., & Sharps, M. J. (2003). Cognitive aging and physical exercise. *Educational Gerontology*, *29*(4), 327-337. https://doi.org/10.1080/713844341

Woodhull-McNeal, A. P. (1992). Changes in posture and balance with age. *Aging (Milan, Italy)*, *4*(3), 219-225. https://doi.org/10.1007/BF03324095

World Health Organization. (2015). *World report on ageing and health*. World Health Organization. https://apps.who.int/iris/handle/10665/186463

World Health Organization. (2022). *Ageing and health*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health

Xiong, J., Ye, M., Wang, L., & Zheng, G. (2021). Effects of physical exercise on executive function in cognitively healthy older adults : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *International Journal of Nursing Studies*, *114*, 103810. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2020.103810

Xue, G. (2018). The Neural Representations Underlying Human Episodic Memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(6), 544-561. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.004

Yang, P.-Y., Ho, K.-H., Chen, H.-C., & Chien, M.-Y. (2012). Exercise training improves sleep quality in middle-aged and older adults with sleep problems : A systematic review. *Journal of Physiotherapy*, *58*(3), 157-163. https://doi.org/10.1016/S1836-9553(12)70106-6

Yaple, Z. A., Stevens, W. D., & Arsalidou, M. (2019). Meta-analyses of the n-back working memory task : fMRI evidence of age-related changes in prefrontal cortex involvement across the adult lifespan. *NeuroImage*, *196*, 16-31. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.03.074

Yee, N., & Bailenson, J. (2006). Walk a mile in digital shoes : The impact of embodied perspective-taking on the reduction of negative stereotyping in immersive virtual environments. *Teleoperators and Virtual Environments - Presence*.

Yee, N., & Bailenson, J. (2007). The Proteus Effect : The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. *Human Communication Research*, *33*(3), 271-290. https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2007.00299.x

Yee, N., Bailenson, J. N., & Ducheneaut, N. (2009). The Proteus Effect : Implications of Transformed Digital Self-Representation on Online and Offline Behavior. *Communication Research*, *36*(2), 285-312. https://doi.org/10.1177/0093650208330254

Yochim, B. P., Mueller, A. E., & Segal, D. L. (2013). Late life anxiety is associated with decreased memory and executive functioning in community dwelling older adults. *Journal of Anxiety Disorders*, *27*(6), 567-575. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2012.10.010

Yoo, S.-C., Peña, J. F., & Drumwright, M. E. (2015). Virtual shopping and unconscious persuasion : The priming effects of avatar age and consumers' age discrimination on purchasing and prosocial behaviors. *Computers in Human Behavior*, *48*, 62-71. https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.01.042

Yu, Z., & Wang, L. (2017). Do Physical Properties Affect Enactment Effect? The Regulatory Function of Item Familiarity. *The American Journal of Psychology*, *130*(3), 315. https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.130.3.0315

Zacks, R. T., Hasher, L., & Li, K. Z. H. (2000). Human memory. In *Handbook of aging and cognition* (MJ: Erlbaum).

Zeelenberg, R., Remmers, S., Blaauwgeers, F., & Pecher, D. (2020). The Influence of Poststudy Action Congruency on Memory Consolidation. *Experimental Psychology*, *67*(4), 211-223. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000490

Zijlstra, E., Hagedoorn, M., Krijnen, W. P., van der Schans, C. P., & Mobach, M. P. (2016). Route complexity and simulated physical ageing negatively influence wayfinding. *Applied Ergonomics*, *56*, 62-67. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.03.009

Zuber, S., Ihle, A., Loaiza, V. M., Schnitzspahn, K. M., Stahl, C., Phillips, L. H., Kaller, C. P., & Kliegel, M. (2019). Explaining age differences in working memory : The role of updating, inhibition, and shifting. *Psychology & Neuroscience*, *12*, 191-208. https://doi.org/10.1037/pne0000151

Annexes

Sommaire

ANNEXE 1. *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur le nombre de pions placés 201

ANNEXE 2. *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur la vitesse de marche 202

ANNEXE 3. *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur les temps de levers de chaise..... 203

ANNEXE 4. *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x catégories de verbes sur le pourcentage de réponses correctes à la tâche de mémoire 204

Annexe 1 : *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur le nombre de pions placés

		t	p_{tukey}
Groupe 1, Essai 1	Groupe 2, Essai 1	-0.568	0.999
	Groupe 3, Essai 1	0.546	0.999
	Groupe 4, Essai 1	4.225	**0.001**
	Groupe 1, Essai 2	-2.460	0.229
	Groupe 2, Essai 2	5.691	**< .001**
	Groupe 3, Essai 2	8.176	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	3.086	0.051
Groupe 2, Essai 1	Groupe 3, Essai 1	1.128	0.949
	Groupe 4, Essai 1	4.826	**< .001**
	Groupe 1, Essai 2	-0.949	0.980
	Groupe 2, Essai 2	10.175	**< .001**
	Groupe 3, Essai 2	8.788	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	3.689	**0.008**
Groupe 3, Essai 1	Groupe 4, Essai 1	3.729	**0.007**
	Groupe 1, Essai 2	-2.091	0.428
	Groupe 2, Essai 2	5.267	**< .001**
	Groupe 3, Essai 2	12.725	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	2.572	0.178
Groupe 4, Essai 1	Groupe 1, Essai 2	-5.829	**< .001**
	Groupe 2, Essai 2	1.808	0.616
	Groupe 3, Essai 2	4.381	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	-1.969	0.509
Groupe 1, Essai 2	Groupe 2, Essai 2	7.209	**< .001**
	Groupe 3, Essai 2	9.702	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	4.696	**< .001**
Groupe 2, Essai 2	Groupe 3, Essai 2	2.391	0.256
	Groupe 4, Essai 2	-2.945	0.074
Groupe 3, Essai 2	Groupe 4, Essai 2	-5.536	**< .001**

Note. *Groupe 1* = adultes jeunes contrôles, *Groupe 2* = adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *Groupe 3* = adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », *Groupe 4* = adultes âgés contrôles

Annexe 2 : *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur la vitesse de marche

		t	p_{tukey}
Groupe 1, Essai 1	Groupe 2, Essai 1	-1.950	0.520
	Groupe 3, Essai 1	-2.308	0.299
	Groupe 4, Essai 1	-1.572	0.766
	Groupe 1, Essai 2	-1.003	0.973
	Groupe 2, Essai 2	-0.415	1.000
	Groupe 3, Essai 2	0.434	1.000
	Groupe 4, Essai 2	-1.150	0.944
Groupe 2, Essai 1	Groupe 3, Essai 1	-0.329	1.000
	Groupe 4, Essai 1	0.495	1.000
	Groupe 1, Essai 2	1.368	0.870
	Groupe 2, Essai 2	2.649	0.155
	Groupe 3, Essai 2	2.428	0.239
	Groupe 4, Essai 2	0.916	0.984
Groupe 3, Essai 1	Groupe 4, Essai 1	0.853	0.989
	Groupe 1, Essai 2	1.719	0.675
	Groupe 2, Essai 2	1.897	0.556
	Groupe 3, Essai 2	4.864	**< .001**
	Groupe 4, Essai 2	1.285	0.903
Groupe 4, Essai 1	Groupe 1, Essai 2	0.954	0.980
	Groupe 2, Essai 2	1.131	0.948
	Groupe 3, Essai 2	2.067	0.443
	Groupe 4, Essai 2	0.774	0.994
Groupe 1, Essai 2	Groupe 2, Essai 2	0.167	1.000
	Groupe 3, Essai 2	1.025	0.970
	Groupe 4, Essai 2	-0.533	0.999
Groupe 2, Essai 2	Groupe 3, Essai 2	0.860	0.989
	Groupe 4, Essai 2	-0.710	0.997
Groupe 3, Essai 2	Groupe 4, Essai 2	-1.635	0.728

Note. *Groupe 1* = adultes jeunes contrôles, *Groupe 2* = adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *Groupe 3* = adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », *Groupe 4* = adultes âgés contrôles

Annexe 3 : *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x essai sur les temps de levers de chaise

		t	p_{tukey}
Groupe 1, Essai 1	Groupe 2, Essai 1	1.557	0.774
	Groupe 3, Essai 1	0.527	0.999
	Groupe 4, Essai 1	-1.092	0.957
	Groupe 1, Essai 2	0.928	0.982
	Groupe 2, Essai 2	0.161	1.000
	Groupe 3, Essai 2	-0.361	1.000
	Groupe 4, Essai 2	-0.729	0.996
Groupe 2, Essai 1	Groupe 3, Essai 1	-1.061	0.963
	Groupe 4, Essai 1	-2.742	0.123
	Groupe 1, Essai 2	-1.084	0.959
	Groupe 2, Essai 2	-2.749	0.124
	Groupe 3, Essai 2	-1.952	0.519
	Groupe 4, Essai 2	-2.379	0.264
Groupe 3, Essai 1	Groupe 4, Essai 1	-1.674	0.704
	Groupe 1, Essai 2	-0.047	1.000
	Groupe 2, Essai 2	-0.365	1.000
	Groupe 3, Essai 2	-1.796	0.625
	Groupe 4, Essai 2	-1.305	0.895
Groupe 4, Essai 1	Groupe 1, Essai 2	1.592	0.754
	Groupe 2, Essai 2	1.262	0.910
	Groupe 3, Essai 2	0.731	0.996
	Groupe 4, Essai 2	0.761	0.995
Groupe 1, Essai 2	Groupe 2, Essai 2	-0.311	1.000
	Groupe 3, Essai 2	-0.840	0.990
	Groupe 4, Essai 2	-1.230	0.921
Groupe 2, Essai 2	Groupe 3, Essai 2	-0.527	0.999
	Groupe 4, Essai 2	-0.900	0.985
Groupe 3, Essai 2	Groupe 4, Essai 2	-0.361	1.000

Note. *Groupe 1* = adultes jeunes contrôles, *Groupe 2* = adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *Groupe 3* = adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », *Groupe 4* = adultes âgés contrôles

Annexe 4 : *Post-Hoc* avec corrections de Tukey pour l'interaction groupe x catégories de verbes sur le pourcentage de réponses correctes à la tâche de mémoire

		t	p_{tukey}
Groupe 1, Mains	Groupe 2, Mains	-0.905	0.999
	Groupe 3, Mains	1.257	0.983
	Groupe 4, Mains	1.058	0.996
	Groupe 1, Pieds	-0.596	1.000
	Groupe 2, Pieds	-0.203	1.000
	Groupe 3, Pieds	0.433	1.000
	Groupe 4, Pieds	1.197	0.989
	Groupe 1, Non-action	0.527	1.000
	Groupe 2, Non-action	0.333	1.000
	Groupe 3, Non-action	-0.359	1.000
	Groupe 4, Non-action	5.865	**< .001**
Groupe 2, Mains	Groupe 3, Mains	2.223	0.535
	Groupe 4, Mains	2.143	0.593
	Groupe 1, Pieds	0.390	1.000
	Groupe 2, Pieds	0.910	0.999
	Groupe 3, Pieds	1.393	0.964
	Groupe 4, Pieds	2.235	0.526
	Groupe 1, Non-action	1.361	0.969
	Groupe 2, Non-action	1.604	0.906
	Groupe 3, Non-action	0.564	1.000
	Groupe 4, Non-action	7.304	**< .001**
Groupe 3, Mains	Groupe 4, Mains	-0.064	1.000
	Groupe 1, Pieds	-1.738	0.849
	Groupe 2, Pieds	-1.494	0.941
	Groupe 3, Pieds	-0.991	0.998
	Groupe 4, Pieds	0.024	1.000
	Groupe 1, Non-action	-0.775	1.000
	Groupe 2, Non-action	-0.938	0.999
	Groupe 3, Non-action	-1.981	0.706
	Groupe 4, Non-action	4.912	**< .001**
Groupe 4, Mains	Groupe 1, Pieds	-1.601	0.907
	Groupe 2, Pieds	-1.416	0.959
	Groupe 3, Pieds	-0.729	1.000
	Groupe 4, Pieds	0.111	1.000

		t	p_{tukey}
	Groupe 1, Non-action	-0.679	1.000
	Groupe 2, Non-action	-0.863	0.999
	Groupe 3, Non-action	-1.524	0.932
	Groupe 4, Non-action	6.127	**< .001**
Groupe 1, Pieds	Groupe 2, Pieds	0.313	1.000
	Groupe 3, Pieds	0.968	0.998
	Groupe 4, Pieds	1.607	0.905
	Groupe 1, Non-action	1.123	0.993
	Groupe 2, Non-action	0.849	0.999
	Groupe 3, Non-action	0.152	1.000
	Groupe 4, Non-action	6.355	< **.001**
Groupe 2, Pieds	Groupe 3, Pieds	0.664	1.000
	Groupe 4, Pieds	1.510	0.936
	Groupe 1, Non-action	0.658	1.000
	Groupe 2, Non-action	0.694	1.000
	Groupe 3, Non-action	-0.165	1.000
	Groupe 4, Non-action	6.579	**< .001**
Groupe 3, Pieds	Groupe 4, Pieds	0.796	1.000
	Groupe 1, Non-action	0.019	1.000
	Groupe 2, Non-action	-0.108	1.000
	Groupe 3, Non-action	-0.990	0.998
	Groupe 4, Non-action	5.708	**< .001**
Groupe 4, Pieds	Groupe 1, Non-action	-0.765	1.000
	Groupe 2, Non-action	-0.957	0.998
	Groupe 3, Non-action	-1.614	0.902
	Groupe 4, Non-action	6.016	**< .001**
Groupe 1, Non-action	Groupe 2, Non-action	-0.122	1.000
	Groupe 3, Non-action	-0.831	1.000
	Groupe 4, Non-action	5.173	**< .001**
Groupe 2, Non-action	Groupe 3, Non-action	-0.721	1.000
	Groupe 4, Non-action	6.029	**< .001**
Groupe 3, Non-action	Groupe 4, Non-action	6.314	**< .001**

Note. *Groupe 1* = adultes jeunes contrôles, *Groupe 2* = adultes jeunes portant le simulateur sans contexte « menaçant », *Groupe 3* = adultes jeunes portant le simulateur avec contexte « menaçant », *Groupe 4* = adultes âgés contrôles

Résumé

Ilona MOUTOUSSAMY

Implication du corps dans les performances mnésiques d'adultes âgés et d'adultes jeunes en situation de vieillissement fictif : illustration par l'activité physique et la motricité

RÉSUMÉ

Cette thèse avait pour objectif d'étudier l'implication du corps sur les performances mnésiques au cours de vieillissement. Cette implication a été investiguée à l'aide de deux facteurs, étudiés séparément : l'activité physique d'une part et la motricité d'autre part.

Dans deux expériences, les bénéfices de l'activité physique sur la mémoire ont été mis en lien avec les ressources exécutives nécessaires à la réalisation de la tâche mnésique. Ainsi, l'activité physique permettrait de protéger de la dégradation des performances mnésiques, particulièrement sur les tâches les plus coûteuses. Dans deux autres expériences, l'implication de la motricité au sein des traces mnésiques a été mise en lien avec un contexte psychosocial « menaçant » (activation des stéréotypes négatifs sur le vieillissement) chez des adultes jeunes. En d'autres termes, lorsque les adultes jeunes sont mis en situation de vieillissement fictif sur un temps court à l'aide de simulateur de vieillissement, la diminution motrice associée à un contexte « menaçant » affecte les performances mnésiques des verbes d'action uniquement.

Ce travail de thèse propose une évaluation de l'implication du corps dans les processus mnésiques d'adultes âgés et d'adultes jeunes mis en situation de vieillissement fictif. En conclusion, le corps semble impliqué dans les performances mnésiques, au travers d'un soutien exécutif et de la distinctivité des traces mnésiques considérées comme modales. Les deux facteurs, explorés séparément dans ce travail, pourront être étudiés conjointement dans de futures recherches afin de rendre compte des liens complexes entre corps, environnement et mémoire.

Mots clés : vieillissement, simulateur de vieillissement, mémoire, activité physique, motricité, cognition incarnée et située, stéréotypes

SUMMARY

The aim of this thesis was to study the body's involvement in memory performance during aging. The involvement of the body in memory processes was investigated using two factors, studied separately: physical activity and motor skills.

In two experiments, the benefits of physical activity on memory were associated to the executive resources required to perform the memory task. In this way, physical activity could protect against the age-related memory decline, particularly on the most demanding tasks. In two other experiments, the involvement of motor skills in memory traces was linked to a "threatening" psychosocial context (activation of negative stereotypes about aging) in younger adults. More precisely, when younger adults were placed in a short-time fictive aging situation using an aging simulator, the motor decrease associated with a "threatening" context affected the memory performance of action verbs only.

This thesis proposes an evaluation of the body's involvement in the memory processes of older and younger adults in fictive aging situation. In conclusion, the body seems to be involved in memory performance, through executive support and the distinctiveness of memory traces considered as modal. The two factors, explored separately in this work, could be studied jointly in future research to account for the complex relationships between body, environment and memory.

Keywords: aging, aging suit, memory, physical activity, motor skills, embodied and situated cognition, stereotypes