Entraînement combiné simultané et vieillissement : effets des modalités d'intervention sur les capacités physiques, motrices et cognitives

Néva Béraud-Peigné

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné. Entraînement combiné simultané et vieillissement : effets des modalités d'intervention sur les capacités physiques, motrices et cognitives. Psychologie. Université Paris-Saclay, 2025. Français. ⟨NNT : 2025UPASW009⟩. ⟨tel-05579307⟩

HAL Id: tel-05579307

https://theses.hal.science/tel-05579307v1

Submitted on 3 Apr 2026

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

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

HAL Authorization

THESE DE DOCTORAT

NNT : 2025UPASW009

Entraînement combiné simultané et vieillissement : effets des modalités d'intervention sur les capacités physiques, motrices et cognitives

Simultaneous Combined Training and Aging: Effects of Intervention Modalities on Physical, Motor, and Cognitive Functions

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n° 566, Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain (SSMMH)
Spécialité de doctorat : Sciences du Sport et du Mouvement Humain
Graduate School : Sport, Mouvement et Facteurs Humains.
Référent : Faculté des Sciences du Sport

Thèse préparée dans l'unité de recherche **CIAMS** (Université Paris-Saclay), sous la direction d'**Alexandra PERROT**, Professeure des Universités, et le co-encadrement de **Pauline MAILLOT**, Maîtresse de Conférences.

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 14 novembre 2025, par

Néva BÉRAUD-PEIGNÉ

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Anaïck PERROCHON Professeur des Universités, Université de Limoges	Président du jury
Louis BHERER Professeur des Universités, Université de Montréal	Rapporteur et examinateur
Olivier DUPUY Professeur des Universités, Université de Poitiers	Rapporteur et examinateur
Karen DAVRANCHE Chargée de recherche, CNRS, Aix-Marseille Université	Examinatrice

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Titre : Entraînement combiné simultané et vieillissement : effets des modalités d'intervention sur les capacités physiques, motrices et cognitives

Mots clés : exergames, personnes âgées, cognition, double-tâche, rétention, prévention.

Résumé : Face au vieillissement de la population, la recherche d'interventions préventives efficaces constitue une priorité. Cette thèse vise à identifier les modalités d'entraînement les plus efficaces et attrayantes pour améliorer les capacités physiques, motrices, cognitives, et en Double-Tâche (DT) chez les personnes âgées en bonne santé. Elle compare les effets de l'entraînement simultané (cognitif, physique et/ou moteur) à ceux de modalités isolées (cognitive, physique). Elle examine également l'impact du lien entre la tâche motrice et cognitive (modalité additionnelle vs incorporée selon le modèle d'Herold et al., 2018) et de l'environnement (naturel vs virtuel) à travers différents programmes d'exergames et d'Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C).

Trois études préliminaires ont été menées en amont de l'étude principale : deux ont examiné la pertinence de nouveaux tests cognitifs et de DT (études 1 et 2) et une a porté sur l'analyse de l'expérience globale des exergames (étude 3) utilisés dans le protocole interventionnel. L'étude principale (étude 4) a évalué l'effet de différents programmes. Au total, 174 personnes âgées ont participé à un entraînement de 12 semaines, comprenant deux séances d'une heure par semaine. Elles ont été réparties en sept groupes : quatre groupes ont suivi des programmes simultanés, dont trois incorporés qui se distinguent par leur complexité motrice et leur rapport à la technologie [AM2C, exergames assistés par une console grand public (SWITCH), et des Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I)]. Un dernier groupe simultané, de type additionnel, a pédalé sur un vélo tout en jouant à un Jeu Vidéo sans lien moteur direct (VÉLO-JV). Le protocole comprend également deux groupes contrôles actifs, l'un faisant uniquement du vélo (VÉLO), l'autre jouant uniquement à un Jeu Vidéo (JV), ainsi qu'un groupe contrôle inactif.

Les résultats de l'étude principale indiquent des améliorations liées à l'entraînement simultané pour certaines capacités cognitives (i.e., mémoire visuospatiale à court terme, flexibilité cognitive), physiques et motrices (i.e., force du bas du corps, équilibre, coordination) ainsi qu'en DT cognitivo-motrice. L'entraînement simultané se révèle supérieur à l'entraînement cognitif (i.e., force du bas du corps, équilibre, coordination) et à l'entraînement physique (i.e., équilibre, coordination). En revanche, l'entraînement cognitif génère davantage de bénéfices que l'entraînement simultané sur l'inhibition. De manière générale, l'approche incorporée (notamment EM2I, AM2C), comparée à l'additionnelle, se montre plus efficace. L'environnement (virtuel vs naturel) module différemment les effets, en fonction des catégories de capacités (cognitives vs physiques et motrices). Enfin, l'étude 5 constate que peu de bénéfices se maintiennent 3 mois après l'arrêt des interventions.

Cette thèse, centrée sur l'impact de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements physique et cognitif, ne soutient pas sa supériorité sur les capacités cognitives, contrairement à ce que postule le modèle de la facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013). Pour autant, l'entraînement incorporé reste une modalité d'entraînement simultané particulièrement pertinente, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche, notamment via les EM2I. Cependant, leur accessibilité opérationnelle dans le cadre de programmes collectifs est limitée. Ce point est d'autant plus crucial que les effets se maintiennent peu après l'arrêt de l'entraînement, accentuant la nécessité d'un engagement à long terme.

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Title: Simultaneous Combined Training and Aging: Effects of Intervention Modalities on Physical, Motor, and Cognitive Functions

Keywords: exergames, older adults, cognition, dual-task, follow-up, prevention

Abstract: In the context of population aging, the search for effective preventive interventions has become a priority. This thesis aims to identify the most effective and attractive training modalities to improve physical, motor, cognitive, and Dual-Task (DT) functions in healthy older adults. It compares the effects of simultaneous training (cognitive, physical, and/or motor) with those of isolated modalities (cognitive, physical). It also examines the impact of the link between motor and cognitive tasks (additional vs incorporated modality, according to the model of Herold et al., 2018) and of the environment (natural vs virtual) through various exergame programs and complex motor and cognitive activities (*in French: Activités Motrices et Cognitives Complexes, AM2C*).

Three preliminary studies were conducted prior to the main study: two assessed the relevance of new cognitive and DT tests (studies 1 and 2), and one focused on analyzing the overall experience of exergames (study 3) used in the intervention protocol. The main study (study 4) evaluated the effects of different programs. In total, 174 older adults participated in a 12-week training program, consisting of two one-hour sessions per week. They were divided into seven groups: four groups underwent simultaneous programs, three of which were incorporated trainings differing in motor complexity and technological integration [AM2C, exergames assisted by a commercial console (SWITCH), and exergames assisted by an Immersive and Interactive Wall (*in French: Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif, EM2I*)]. Another simultaneous (additional) group cycled while playing a video game without direct motor coupling (VÉLO-JV). The protocol also included two active control groups: one practicing only cycling (VÉLO), the other playing only a video game (JV), as well as an inactive control group.

The results of the main study reveal improvements associated with simultaneous training in certain cognitive abilities (i.e., short-term visuospatial memory, cognitive flexibility), as well as in physical and motor functions (i.e., lower-body strength, balance, coordination) and in cognitive-motor DT. Simultaneous training proves superior to cognitive training (i.e., lower-body strength, balance, coordination) and physical training (i.e., balance, coordination). However, cognitive training produces greater benefits than simultaneous training in inhibition. Overall, the incorporated approach (particularly EM2I and AM2C), compared to the additional one, shows greater effects. The environment (virtual vs natural) differentially modulates the effects depending on the capacity category (cognitive vs physical and motor). Finally, study 5 finds that few benefits are maintained three months after the interventions end.

This thesis, centered on the impact of simultaneous training compared to physical and cognitive training, does not support its superiority in cognitive functions, contrary to the guided plasticity facilitation framework (Fissler et al., 2013). Nevertheless, the incorporated training approach remains a particularly relevant form of simultaneous training, opening new research perspectives, notably through EM2I. However, its operational accessibility within collective programs is limited. This point is particularly relevant given the limited persistence of effects after training cessation, underlining the importance of long-term engagement.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements aux membres de mon jury, Karen Davranche, Louis Bherer, Olivier Dupuy et Anaïck Perrochon. Merci d'avoir accepté d'évaluer ce travail, d'y avoir consacré de votre temps et de partager votre expertise. C'est un honneur et une chance de pouvoir bénéficier de votre regard sur ce projet. Merci également à Caroline Teulier et Cédric Albinet, membres de mon CSI, pour le suivi de cette thèse et pour vos conseils dans la conduite de celle-ci.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans mes deux directrices : Queen P et Pop's 40, plus connues en tant qu'Alexandra Perrot et Pauline Maillot. Vous m'avez fait vivre trois années de thèse (et déjà deux de master avant cela !) incroyables. Une simple partie « remerciements » ne suffira jamais à exprimer la gratitude que je ressens envers vous. Vous m'avez donné le goût de la recherche dès nos tout premiers échanges et m'avez aidé à trouver ma voie. Merci de m'avoir guidée avec bienveillance, d'avoir su construire, faire évoluer et aboutir ce projet qui nous paraissait ambitieux, tout en me laissant l'autonomie, l'espace et la confiance nécessaires pour m'épanouir. Merci de m'avoir accueillie dans votre duo, devenu au fil du temps une véritable « Team de choc », aussi performante lors des parties de fléchettes que dans l'art de divaguer en réunion. Je vous dois énormément, tant sur le plan scientifique que sur le plan personnel. Tous ces moments partagés en dehors de la recherche, à vos côtés, ont énormément compté.

Alexandra, tu m'as transmis le sens de la rigueur, qui m'a donné envie d'être à la hauteur. Toujours à l'affût d'une meilleure formulation, d'un élément non aligné ou d'une faute, tu m'as appris à quel point chaque détail compte. Mais, surtout, tu sais encourager au bon moment. Tu m'as souvent redonné l'élan nécessaire, parfois même sans t'en rendre compte. Ta confiance m'a portée autant que tes exigences m'ont structurée.

Pauline, tu m'as toujours impressionnée par ta capacité à avoir de nouvelles idées (et donc de nouvelles manips… !). Tu as su trouver les mots pour m'accompagner, dans les moments d'enthousiasme comme dans ceux d'incertitude. Merci pour ton soutien constant, ton humour et ta bienveillance qui m'ont permis d'avancer avec confiance et sérénité.

Deux « mamans », donc deux maisons : je souhaite remercier mes deux laboratoires pour leur soutien, leur accueil et la place qui m'a été accordée. Ces années ont été rythmées par de belles rencontres : à l'I3SP, à travers nos sessions de basket, nos discussions animées du midi et nos journées vestimentaires thématiques, ainsi qu'au CIAMS pendant nos pauses caf' ou au PMU. Merci à tous les

« bébés chercheurs » que j'ai croisés pour avoir rendu ces années si riches humainement. Je pense en particulier à toi, Mathilda, avec qui les « blablaruns » ne cessent de s'allonger. Merci d'être devenue une précieuse amie, sur qui je peux compter à tout moment. Je te souhaite sincèrement de très belles réussites, et j'espère que nous continuerons à nous épauler mutuellement, comme nous l'avons toujours fait. À vous aussi, Marie-Philippine, Marine, Éléna, Louis, Ugo, Clément, Julien, Baptiste… pour tous ces bons moments, et à toi, Nico, qui aurais aimé redevenir doctorant rien que pour avoir officiellement ta place dans notre bureau. Merci pour ta présence chaleureuse et ton soutien au quotidien (mais surtout pour les bonbons que tu rapportes).

Un immense merci également à mes deux stagiaires, Marion et Artiome. Votre implication a été précieuse pour l'aboutissement de ce projet. Travailler avec vous a été autant un soutien qu'un plaisir.

Cette thèse n'aurait évidemment pas vu le jour sans tous mes participants. Merci à chacune et chacun d'entre vous pour votre disponibilité, votre engagement et la confiance que vous m'avez accordée. J'espère de tout cœur que cette expérience vous a permis de découvrir, d'apprendre ou simplement de passer un bon moment, et que vous en avez retiré autant que ce que vous m'avez apporté. Vous manquez aux gymnases de Montreuil et de Créteil, tout comme aux couloirs de l'I3SP, qui paraissent désormais beaucoup plus calmes.

Je tiens également à remercier l'ensemble des partenaires ayant permis le bon déroulement des programmes, à savoir les villes de Montreuil, Créteil et Paris. En particulier à Tristan Fernandez Vega, Sylvie Brault, Maxime Lebaube et Alexandre Bailly pour votre aide et votre gentillesse. Merci aussi à la Fondation Mutuelle Générale pour le financement octroyé pour la mise en place de l'étude principale de cette thèse.

Et puis, au-delà des laboratoires, une troisième maison, ou plutôt une deuxième famille, a vu le jour en même temps que cette thèse : merci à tous les membres de MooveToi. Plus particulièrement à toi, Sterenn, qui as rejoint l'aventure avec tant d'enthousiasme et d'énergie. Il suffit d'une simple discussion avec toi pour retrouver ce goût ou cette envie qui pouvaient, parfois, s'effacer un peu. Et, comme souvent, les bonnes choses vont par trois : merci aussi à toi, Alex, mon frère de cœur, avec qui j'ai toujours eu la chance de travailler de manière fluide et instinctive. Ta simplicité, ton humour et ta bienveillance font de toi un ami dont je ne pourrais me passer. Sterenn, Alexandre, notre relation, à la fois amicale et professionnelle, a grandi et s'est consolidée au fil des années. Je suis immensément fière d'évoluer avec vous, de l'ensemble des projets que nous avons construits tous les trois, et je suis déjà impatiente de voir ce que nous bâtirons par la suite. Encore merci d'avoir été si présents, tout

particulièrement en cette fin de thèse. Merci aussi à Nico, Clem, Valentin, Mélissa, Kaouter et à toutes celles et ceux qui sont passés par MooveToi et y ont laissé leur empreinte.

Laurine, Gaétan, Sarah, Laura : merci pour votre énergie, votre humour et votre amitié. Ces soirées, week-ends et vacances partagés ensemble sont des souvenirs qui me sont chers. Vous êtes une part essentielle de ces dernières années.

Un merci tout particulier à mon frère Vlad, mon fidèle relecteur d'articles et de thèse. Merci à mes parents pour leur soutien et leur enthousiasme à chacune de mes aventures. Vous m'avez appris à regarder les choses sous un autre angle, à douter, à chercher, à comprendre. Sans vous, je n'aurais probablement jamais eu autant envie de me poser des questions, ni eu le courage d'en chercher les réponses. Merci de m'avoir transmis votre curiosité, mais surtout cette habitude de toujours tout remettre en question. Finalement… il fallait bien que ça finisse en thèse ! Maman, ta force m'inspire chaque jour, et j'espère devenir, à mon tour, une femme aussi forte que toi.

Enfin, merci à toi, Rémi, pour ton amour, ton soutien et l'équilibre que tu m'apportes au quotidien.

Table des matières

LISTE DES FIGURES **13**

LISTE DES TABLEAUX **16**

LISTE DES ÉQUATIONS **18**

LISTE DES ABRÉVIATIONS **19**

INTRODUCTION **21**

CHAPITRE 1 – VIEILLISSEMENT ET CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES ET COGNITIVES **25**

1. EFFETS DU VIEILLISSEMENT SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES ET MOTRICES 25
2. LE VIEILLISSEMENT COGNITIF 27
2.1. Modèles théoriques du vieillissement cognitif *27*
2.1.1. L'hypothèse des capacités en mémoire de travail 28
2.1.2. L'hypothèse de la vitesse de traitement 28
2.1.3. L'hypothèse du contrôle exécutif 28
2.2. Vieillissement neurocardiovasculaire *29*
2.3. Impact du vieillissement sur les fonctions cognitives *30*
2.3.1. La variabilité intra-individuelle 30
2.3.2. La variabilité inter-individuelle 31
2.4. Concept de l'enrichissement cognitif : un modèle dynamique du vieillissement *33*

CHAPITRE 2 – VERS UNE ÉVALUATION PLUS ÉCOLOGIQUE ET FONCTIONNELLE **36**

1. LES CAPACITÉS DE DOUBLE-TÂCHE 36
1.1. Définition et modèles *36*
1.1.1. Modèle du goulot d'étranglement 36
1.1.2. Modèle du partage de capacité 37
1.2. Caractéristiques de la double-tâche *38*
1.2.1. L'effet de double-tâche : définition et mesures 38
1.2.2. Influence des paramètres de la tâche 39
1.3. Effets du vieillissement sur les performances en double-tâche *41*
2. LIMITES DES ÉVALUATIONS ACTUELLES ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION 42
2.1. Les évaluations conventionnelles et leurs limites *42*
2.1.1. L'évaluation cognitive 42
2.1.2. L'évaluation des capacités en double-tâche 44
2.2. Développement de nouvelles méthodes *45*
2.2.1. Nouvelles approches d'évaluation cognitive 45
2.2.2. Nouvelles approches pour l'évaluation en double-tâche 46

CHAPITRE 3 - ENTRAÎNEMENTS PHYSIQUE ET COGNITIF : APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES, ENJEUX D'ÉVALUATION, EFFETS SUR LE VIEILLISSEMENT **49**

1. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES 50
1.1. Approche transversale *50*
1.2. Approche longitudinale *51*
1.3. Approche interventionnelle *51*
1.3.1. Intérêts et limites 51
1.3.2. Effets de transfert et de rétention 52
2. EFFETS DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES ET EN DOUBLE-TÂCHE 54
2.1. Évaluation, effets et mécanismes de l'activité physique sur les capacités physiques et motrices *54*
2.1.1. Méthodes d'évaluation des effets physiques et moteurs 54
2.1.2. Les effets de l'activité physique sur les capacités physiques et motrices 55
2.1.3. Mécanismes physiologiques impliqués dans les effets de l'activité physique 57
2.1.3.1. Adaptations cardiovasculaires à l'entraînement 57

2.1.3.2. Adaptations musculaires et motrices à l'entraînement ... 58
2.2. Effets, modalités et mécanismes de l'activité physique sur les capacités cognitives ... 59
2.2.1. Rôle de l'entraînement aérobie dans les effets cognitifs ... 59
2.2.2. Autres formes d'activités physiques et effets différenciés sur la cognition ... 60
2.2.3. Vers une approche globale de l'activité physique pour la santé cognitive ... 62
2.2.4. Mécanismes neurophysiologiques impliqués dans les effets cognitifs ... 63
2.2.4.1. Hypothèse circulatoire ... 63
2.2.4.2. Hypothèse de l'augmentation de la neurogenèse ... 63
2.2.4.3. Hypothèse de l'augmentation de la plasticité synaptique ... 64
2.2.4.4. Hypothèse de l'augmentation des catécholamines cérébrales ... 65
2.2.4.5. Hypothèse neurotrophique ... 65
2.3. Effets de l'activité physique sur les capacités de double-tâche ... 65
2.3.1. Double-tâche cognitivo-cognitive ... 66
2.3.2. Double-Tâche cognitivo-motrice ... 67
2.4. Recommandations et freins à la pratique de l'activité physique ... 68
2.4.1. Recommandations ... 68
2.4.2. Freins à la pratique de l'activité physique ... 69
3. EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT COGNITIF SUR LES FONCTIONS COGNITIVES : TYPES D'INTERVENTIONS ET MÉCANISMES ... 70
3.1. Typologies des stimulations cognitives ... 70
3.1.1. Entraînements cognitifs basés sur le processus ... 70
3.1.2. Entraînements basés sur la nouveauté ... 72
3.2. Jeux vidéo et fonctionnement cognitif ... 72
3.2.1. Définitions ... 72
3.2.2. Effets cognitifs des entraînements via les jeux vidéo ... 74

CHAPITRE 4 - LES APPROCHES D'ENTRAÎNEMENT COMBINÉ PHYSIQUE ET COGNITIF ... 77

1. LES INTERVENTIONS COMBINÉES : THÉORIE ET MÉTHODOLOGIE ... 78
1.1. Définition de l'entraînement combiné : une diversité de formes ... 78
1.1.1. La temporalité ... 78
1.1.1.1. Entraînement combiné séquentiel ... 79
1.1.1.2. Entraînement combiné simultané ... 79
1.1.2. La nature des stimulations motrices et cognitives ... 81
1.1.3. L'environnement ... 81
1.1.4. La dimension sociale ... 83
1.2. Fondements théoriques et effets attendus de l'entraînement combiné ... 84
2. IMPACT DE L'ENTRAÎNEMENT COMBINÉ SUR LES FONCTIONS PHYSIQUES, COGNITIVES ET DOUBLE-TACHE ... 85
2.1. Effets de l'entraînement combiné sur les fonctions cognitives ... 86
2.2. Effets de l'entraînement combiné sur les fonctions physiques et motrices ... 87
2.3. Effets de l'entraînement combiné sur les capacités de double-tâche ... 89
2.4. L'évaluation des effets de rétention ... 90
3. ENTRAÎNEMENT COMBINÉ : APPROCHES UNIQUES OU PLURIELLES ? ... 93
3.1. Entraînement combiné simultané ou séquentiel : quelles différences ? ... 93
3.1.1. Arguments théoriques ... 93
3.1.2. Apports empiriques ... 95
3.2. Entraînement simultané additionnel ou incorporé : quelles différences ? ... 95
3.2.1. Arguments théoriques ... 96
3.2.2. Apports empiriques ... 96
4. DIFFÉRENTES MODALITÉS DE L'ENTRAÎNEMENT INCORPORÉ ... 97
4.1. Des activités motrices et cognitives complexes issues de la coopération et de l'opposition ... 98
4.1.1. Intérêts théoriques ... 98
4.1.2. Apports empiriques ... 99
4.2. Les exergames ... 100
4.2.1. L'intérêt des exergames grand public ... 100
4.2.2. Les effets des exergames sur les capacités cognitives, physiques et double-tâche ... 101

4.2.3. Effets des exergames comparativement à d'autres types d'intervention ... 103
4.2.4. Limites actuelles des recherches sur les exergames ... 104
4.3. Les exergames assistés par un mur immersif et interactif ... 106
4.3.1. Intérêts théoriques ... 106
4.3.2. Apports empiriques ... 111

PROBLÉMATIQUE ... 114

ÉTUDE 1 – APPROCHE ÉCOLOGIQUE DU VIEILLISSEMENT COGNITIVO-MOTEUR : CONTRIBUTION DE NOUVEAUX TESTS PSYCHOMÉTRIQUES NUMÉRIQUES ... 118

1. OBJECTIFS ... 118
2. MÉTHODE ... 120
2.1. Population ... 120
2.2. Matériel et procédure ... 121
2.2.1. Tests cognitifs via le Dispositif Lumineux Interactif (DLI) ... 121
2.2.1.1. Le test d'Inhibition DLI ... 122
2.2.1.2. Les tests de mémoire visuospatiale DLI ... 123
2.2.1.3. Le test de flexibilité DLI ... 124
2.2.2. Tests cognitifs traditionnels ... 125
2.2.2.1. Le test de Corsi ... 125
2.2.2.2. Le test de Stroop ... 125
2.2.2.3. Le Trail Making Test ... 125
2.3. Analyse des données ... 126
3. RÉSULTATS ... 126
3.1. Participants ... 126
3.2. Effets du vieillissement ... 127
3.3. Validité convergente ... 127
4. DISCUSSION ... 130

ÉTUDE 2 : EFFET DU MODE DE GÉNÉRATION DE LA TÂCHE COGNITIVE ET DE L'ÂGE SUR L'EFFET DE DOUBLE-TÂCHE COGNITIF ET MOTEUR ... 133

1. OBJECTIFS ... 133
2. MÉTHODE ... 134
2.1. Population ... 134
2.2. Matériel et procédure ... 134
2.2.1. Simple-Tâches (ST) ... 135
2.2.2. Double-tâches ... 136
2.2.3. Effet de Double-Tâche ... 136
2.3. Analyse des données ... 137
3. RÉSULTATS ... 137
3.1. Participants ... 137
3.2. Résultats sur les tests ST, DT et la DTE ... 138
3.2.1. Résultats en ST ... 138
3.2.2. Résultats en DT ... 138
3.2.3. Résultats sur le DTE ... 140
3.3. Différences entre les DTE moteur et cognitif ... 142
3.3.1. Tâche de décompte (autogénérée) ... 142
3.3.2. Tâche de comptage sonore (environnement) ... 142
3.4. Différence entre la tâche générée par l'environnement (comptage sonore) et la tâche autogénérée (décompte) ... 143
3.4.1. Tâche motrice ... 143
3.4.2. Tâche cognitive ... 143
4. DISCUSSION ... 144
4.1. Effet de l'âge sur les ST et DT ... 144
4.2. Impact de la nature de la tâche cognitive sur le DTE ... 144
4.2.1. Effet différentiel en fonction du mode de génération de la tâche cognitive sur le DTE moteur 144

4.2.2. Effet de l'âge sur l'interférence motrice ... 145
4.2.3. Effet de la nature de la tâche cognitive sur l'interférence entre les tâches motrices et cognitives 145
4.2.4. Effet du mode de génération de la tâche cognitive sur le DTE cognitif ... 146

ÉTUDE 3 - ÉTUDE COMPARATIVE DE L'EXPÉRIENCE GLOBALE D'UNE SESSION DE TROIS DIFFÉRENTS EXERGAMES AUPRÈS DE PERSONNES ÂGÉES ... 149

1. OBJECTIFS ... 149
2. MÉTHODE ... 152
2.1. Population ... 152
2.2. Procédure ... 153
2.3. Mesures ... 157
2.3.1. Fréquence cardiaque ... 157
2.3.2. Questionnaires ... 158
2.4. Analyse des données ... 159
3. RÉSULTATS ... 160
3.1. Expérience utilisateur ... 160
3.2. Plaisir perçu ... 163
3.3. Charge de travail de la session ... 163
3.4. Intensité physique ... 164
3.5. Intention de continuer à jouer à des exergames ... 164
3.6. Corrélations entre les variables ... 164
4. DISCUSSION ... 165

ÉTUDE 4 – EFFETS À COURT TERME DE L'ENTRAÎNEMENT SIMULTANÉ SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES ET EN DOUBLE-TÂCHE CHEZ LES PERSONNES ÂGÉES : LE PROJET GAMAGE ... 170

1. OBJECTIFS ... 170
2. MÉTHODE ... 173
2.1. Population ... 173
2.2. Procédure ... 174
2.3. Les programmes ... 175
2.3.1. Le programme d'Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C) ... 178
2.3.2. Le programme d'Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I) ... 178
2.3.3. Le programme SWITCH ... 179
2.3.4. Le programme VÉLO ... 179
2.3.5. Le programme Jeux Vidéo (JV) ... 180
2.3.6. Le programme vélo et jeux vidéo (VÉLO-JV) ... 180
2.3.7. Le Groupe Contrôle (GC) ... 181
2.4. Mesures ... 181
2.4.1. Uniquement en pré-test ... 182
2.4.2. En pré-tests, en post-tests et en tests de rétention ... 182
2.4.2.1. Tests physiques ... 182
2.4.2.2. Évaluation cognitive ... 184
2.4.2.3. Double-tâches ... 186
2.4.3. Pendant les programmes ... 187
2.4.4. Uniquement en post-test ... 187
2.5. Analyse des données ... 188
2.5.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes ... 188
2.5.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests ... 188
2.5.3. Analyse des données collectées pendant les séances d'intervention et à la fin des programmes 188
2.5.4. Analyse de l'évolution immédiate entre les pré-tests et les post-tests ... 189
2.5.5. Régression multiple pour prédire l'évolution cognitive ... 189
2.5.6. Informations complémentaires ... 190
2.5.7. Justification ... 190
3. RÉSULTATS ... 191

3.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes ... *191*
3.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests ... *193*
3.3. Analyse des données collectées pendant les séances et à la fin des programmes ... *193*
3.3.1. Complétion ... 193
3.3.2. Compliance ... 195
3.3.3. Intensités physiques objectives et subjectives ... 195
3.3.4. Distance parcourue par les participants des groupes VÉLO et VÉLO-JV ... 198
3.3.5. Évaluation subjective des programmes par les participants ... 198
3.3.6. Corrélations ... 199
3.4. Comparaison de l'effet des programmes en fonction des groupes ... *201*
3.4.1. Capacités physiques et motrices ... 201
3.4.1.1. Capacités musculaires ... 201
3.4.1.2. Souplesse ... 205
3.4.1.3. Équilibre ... 205
3.4.1.4. Coordination ... 206
3.4.1.5. Capacités aérobies ... 207
3.4.2. Capacités cognitives ... 208
3.4.2.1. Temps de réaction ... 211
3.4.2.2. Inhibition ... 212
3.4.2.3. Mémoire visuospatiale à court terme et de travail ... 214
3.4.2.4. Flexibilité cognitive ... 215
3.4.3. Double-tâche ... 216
3.4.3.1. Cognitivo-cognitive ... 216
3.4.3.2. Cognitivo-motrice ... 219
3.5. Prédiction de l'évolution cognitive par les évolutions physiques ... *221*
3.6. Prédiction de l'évolution cognitive par modalités (intensités physique et cognitive, plaisir) des programmes ... *222*
3.6.1. Mémoire visuospatiale à court terme – Empan simple ... 222
3.6.2. Flexibilité cognitive – TMT B-A ... 223
3.7. Récapitulatif des résultats ... *223*
4. DISCUSSION ... 226
4.1. Effets des entraînements sur les capacités physiques et motrices ... *226*
4.1.1. Les effets de l'entraînement simultané par rapport au groupe contrôle ... 226
4.1.2. Les effets de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements cognitif et physique ... 229
4.1.3. Les effets de l'entraînement incorporé par rapport à l'entraînement additionnel ... 229
4.2. Effets des entraînements sur les capacités cognitives ... *232*
4.2.1. Les effets de l'entraînement simultané par rapport au groupe contrôle ... 232
4.2.2. Les effets de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements physique et cognitif ... 234
4.2.3. Les effets de l'entraînement cognitif via les jeux vidéo ... 237
4.2.4. Les effets de l'entraînement cognitif via les jeux vidéo par rapport à l'entraînement simultané 238
4.2.5. Les effets de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel ... 239
4.3. Effets des entraînements sur les capacités de double-tâche ... *241*
4.3.1. Double-tâche cognitivo-motrice ... 241
4.3.2. Double-tâche cognitivo-cognitive ... 242
4.4. Impact de la virtualité ... *242*
4.5. Effets spécifiques des programmes ... *243*
4.6. Le plaisir, un facteur de compliance aux programmes ... *245*
4.7. Limites ... *246*

ÉTUDE 5 – EFFETS DE RÉTENTION DE L'ENTRAÎNEMENT SIMULTANÉ SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES, ET EN DOUBLE-TÂCHE CHEZ LES PERSONNES ÂGÉES : LE PROJET GAMAGE ... 250

1. OBJECTIFS ... 250
2. MÉTHODE ... 253
2.1. Population ... *253*
2.2. Procédure ... *253*
2.3. Les programmes ... *255*

2.4. Mesures ... *255*
2.5. Analyse des données ... *256*
3. RÉSULTATS ... 257
3.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes ... *257*
3.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests ... *257*
3.3. Comparaison de l'effet des programmes en fonction des groupes ... *259*
3.3.1. Capacités physiques et motrices ... 259
3.3.1.1. Capacités musculaires ... 259
3.3.1.2. Souplesse ... 262
3.3.1.3. Coordination ... 263
3.3.2. Fonctions cognitives ... 265
3.3.2.1. Temps de réaction ... 265
3.3.2.2. Inhibition ... 268
3.3.2.3. Flexibilité cognitive ... 269
3.3.3. Double-tâche cognitivo-cognitive ... 270
3.3.3.1. Tâche cognitive 1 : tâche Go/No-Go ... 271
3.3.3.2. Tâche cognitive 2 : tâche de comptage sonore ... 271
3.3.4. Style de vie ... 273
4. DISCUSSION ... 276
4.1. Effets physiques et moteurs des entraînements ... *276*
4.2. Effets cognitifs et en DT ... *279*
4.3. Suivi du style de vie ... *280*

DISCUSSION GÉNÉRALE ... 282

1. L'EFFICACITÉ DES ENTRAÎNEMENTS COMBINÉS : QUELLES PREUVES ? ... 282
1.1. À court terme : des bénéfices cognitifs, mais un effet synergique difficile à démontrer ... *282*
1.2. Des effets physiques et en double-tâche peu évalués ... *285*
1.3. Une efficacité durable ? La question des effets à long terme ... *287*
2. COMPRENDRE LES EFFETS DES ENTRAÎNEMENTS AU-DELÀ DES SCORES DE LA PERFORMANCE : MÉTHODES, OUTILS ET PORTÉE DU TRANSFERT ... 289
2.1. Repenser l'évaluation ... *289*
2.2. Effets de transfert : analyser la portée réelle des entraînements ... *290*
3. DE LA RECHERCHE AUX EXIGENCES DE TERRAIN ... 293
3.1. Adaptation du contenu au public cible ... *293*
3.2. Le plaisir comme facteur de compliance et de maintien ... *295*
3.3. Accessibilité et alternatives : quelles solutions réalistes pour les structures et les usagers ? ... *296*

LISTE DES ANNEXES ... 316

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Représentation du potentiel de développement cognitif au cours de la vie 31
Figure 2. Profils développementaux du vieillissement cognitif selon quatre trajectoires 33
Figure 3. Illustration du modèle conceptuel pour caractériser les schémas de DTE cognitivo-motrice, adaptée et traduite d'après Plummer et al. (2013) 39
Figure 4. Approches cognitives traditionnelles 71
Figure 5. Classification des jeux vidéo 74
Figure 6. Les différentes caractéristiques potentielles de l'entraînement combiné 78
Figure 7. Différents types d'entraînements combinés selon le modèle d'Herold et al. (2018) 80
Figure 8. Continuum Réalité - Virtualité traduit depuis Milgram et al. (1995) 82
Figure 9. Exemple d'exergames assistés par un mur immersif et interactif 107
Figure 10. Description des modalités des EM2I 108
Figure 11. Dispositif Lumineux Interactif (étude 1) 121
Figure 12. Test d'inhibition DLI (étude 1) 122
Figure 13. Tests de mémoire visuospatiale DLI (étude 1) 123
Figure 14. Test de flexibilité DLI 124
Figure 15. Description des ST, DT et DTE (étude 2) 135
Figure 16. Modalités des tâches cognitives (étude 2) 135
Figure 17. Caractéristiques de la performance opérationnelle (étude 2) 141
Figure 18. Différence entre le DTE moteur et cognitif en fonction du groupe lorsque la tâche est autogénérée (étude 2) 142
Figure 19. Différence sur le DTE moteur lorsque la tâche cognitive est autogénérée et générée par l'environnement (étude 2) 143
Figure 20. Caractéristiques de chaque exergame (étude 3) 153
Figure 21. Photographies de chaque groupe d'exergames (étude 3) 154
Figure 22. Description des jeux EM2I utilisés (étude 3) 155
Figure 23. Joy-Con (étude 3) 155
Figure 24. Description des jeux SWITCH utilisés (étude 3) 156
Figure 25. Expérience utilisateur en fonction des groupes (étude 3) 161
Figure 26. Répartition des participants, abandons et suivi à chaque étape de l'étude par groupe expérimental (étude 4) 175
Figure 27. Classification des groupes en fonction du type d'intervention (étude 4) 176
Figure 28. Décomposition des conditions expérimentales selon les caractéristiques des programmes (étude 4) 177
Figure 29. Variables testées en fonction du temps (étude 4) 181

Figure 30. Intensités physiques moyennes et maximales en fonction du groupe (étude 4) 195
Figure 31. Intensités physiques et cognitives subjectives en fonction du groupe (étude 4) 197
Figure 32. Différences d'évolution au test 30 secondes assis-debout en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 204
Figure 33. Différences d'évolution au test du lancer de medicine ball en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 205
Figure 34. Différences d'évolution au test TUG en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 206
Figure 35. Différences d'évolution au test de coordination en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 207
Figure 36. Différences d'évolution au TM6 en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 208
Figure 37. Différences d'évolution aux TR 2 et TR 8 en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 211
Figure 38. Différences d'évolution au score inhibition en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 213
Figure 39. Différences d'évolution à l'écart-type du test Go/No-Go en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 213
Figure 40. Différences d'évolution à l'empan visuospatial simple en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 214
Figure 41. Différences d'évolution au TMT B-A en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 215
Figure 42. Différences d'évolution aux DTE moteur et cognitif en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4) 220
Figure 43. Modèle de régression multiple pour prédire l'évolution de la flexibilité cognitive (étude 4) 221
Figure 44. Modèles de régression multiple pour prédire l'évolution de la mémoire visuospatiale à court terme et de la flexibilité cognitive (étude 4) 222
Figure 45. Répartition des participants, abandons et suivi à chaque étape de l'étude par groupe expérimental (étude 5) 254
Figure 46. Variables testées en fonction des temps de mesure (étude 5) 255
Figure 47. Différences d'évolution au test 30 secondes assis-debout en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 261
Figure 48. Différences d'évolution au test de lancer de medicine ball en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 263
Figure 49. Différences d'évolution au test de coordination en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 264
Figure 50. Différences d'évolution au Temps de réaction à 2 choix en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 267
Figure 51. Différences d'évolution au score d'inhibition en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 268

Figure 52. Différences d'évolution au score TMT B en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 270
Figure 53. Différences d'évolution au score total du General Lifestyle Questionnaire en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5) 274

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques personnelles des participants (étude 1) 126
Tableau 2. Différences entre les tests DLI et TRAD entre les Jeunes et les Âgés (étude 1) 128
Tableau 3. Validité convergente entre les tests DLI et TRAD (étude 1) 129
Tableau 4. Caractéristiques personnelles des participants (étude 2) 137
Tableau 5. Scores en ST pour les Jeunes et les Âgés (étude 2) 139
Tableau 6. Scores en DT et DTE pour les Jeunes et les Âgés (étude 2) 139
Tableau 7. Interprétation des tailles d'effet selon le type de tests statistiques, sur la base des recommandations de Cohen (1988) (étude 3) 160
Tableau 8. Caractéristiques personnelles des participants (étude 3) 160
Tableau 9. Différences des scores d'expérience utilisateur avec la norme 1 (étude 3) 162
Tableau 10. Scores de plaisir perçu, charge de travail et intensités physiques (étude 3) 163
Tableau 11. Corrélations entre l'attractivité totale, le plaisir perçu, la charge de travail, l'intensité subjective, et l'intensité moyenne et maximale (étude 3) 165
Tableau 12. Caractéristiques personnelles des participants (étude 4) 192
Tableau 13. Comparaisons des mesures d'intensités physiques, cognitives, de compliance et de plaisir entre les programmes (étude 4) 194
Tableau 14. Récapitulatif des scores d'évolution des programmes (étude 4) 199
Tableau 15. Corrélations entre les paramètres d'intensité physique, de perception de l'effort et de plaisir (étude 4) 200
Tableau 16. Résultats physiques et moteurs en pré-tests et post-tests en fonction du groupe (étude 4) 202
Tableau 17. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests physiques et moteurs (étude 4) 203
Tableau 18. Résultats cognitifs en pré-tests et en post-tests en fonction du groupe (étude 4) 209
Tableau 19. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests cognitifs (étude 4) 210
Tableau 20. Résultats en ST, DT et DTE en fonction des groupes (étude 4) 217
Tableau 21. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests pour les DTE (étude 4) 218
Tableau 22. Récapitulatif des évolutions aux tests physiques, moteurs, cognitifs et de DT entre les pré-tests et les post-tests (étude 4) 224
Tableau 23. Caractéristiques personnelles des participants (étude 5) 258
Tableau 24. Résultats physiques et moteurs en pré-tests, en post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5) 260

Tableau 25. Résultats aux tests cognitifs en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5) 266
Tableau 26. Résultats aux tests de DT en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5) 272
Tableau 27. Résultats au General Lifestyle Questionnaire en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5) 275

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1. Effet de la double-tâche 38
Équation 2. Score d'interférence 125
Équation 3. Effet de la double-tâche (calcul adapté) 137
Équation 4. Fréquence cardiaque maximale théorique selon Gellish et al. (2007) 157
Équation 5. Intensité moyenne 157
Équation 6. Taux de compliance 187

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACSM : American College of Sports Medicine (Collège américain de médecine du sport)
AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes
BADS : Behavioral Assessment of the Dysexecutive Syndrome (Batterie d'évaluation du syndrome dysexécutif)
BDNF : Brain-Derived Neurotrophic Factor (facteur neurotrophique dérivé du cerveau)
cc : centimètres cubes
cm : centimètre
DLI : Dispositif Lumineux Interactif
DMS : Différence de Moyenne Standardisée
DREES : Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques.
DT : Double-Tâche
DTC : Dual-Task Cost (coût de double-tâche)
DTE : Dual-Task Effect (effet de double-tâche)
EAPA : Enseignant en Activité Physique Adaptée
ECR : Essais Contrôlés Randomisés
EEG : ÉlectroEncéphaloGraphie
EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif
ET : Écart-Type
FC : Fréquence Cardiaque
FCMT : Fréquence Cardiaque Maximale Théorique
FCR : Fréquence Cardiaque de Réserve
FSST : Four-Square Stepping Test (test des quatre carrés)
GC : Groupe Contrôle
GLQ : General Lifestyle Questionnaire (questionnaire général sur le mode de vie)
HAROLD : Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults (réduction de l'asymétrie hémisphérique chez les adultes âgés)
HIIT : High-Intensity Interval Training (entraînement fractionné de haute intensité)
I3SP : Institut des Sciences du Sport-Santé
IC : temps de réaction avec Inhibition Complexe
IC 95 % : Intervalle de Confiance à 95 %
IGF-1 : Insulin-like Growth Factor 1 (facteur de croissance analogue à l'insuline de type 1)
IMC : Indice de Masse Corporelle
Insee : Institut national de la statistique et des études économiques
IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
IS : temps de réaction avec de l'Inhibition Simple
ITT : Intention-To-Treat analysis (analyse en intention de traiter)
JV : Jeux Vidéo
kg : kilogramme
LEMOCOT : Lower Extremity MOtor Coordination Test (test de coordination motrice des membres inférieurs)
m : mètre
M : Moyenne
MET : Metabolic Equivalent of Task (équivalent métabolique de la tâche)
MMSE : Mini-Mental State Examination (Mini-Examen de l'État Mental)
MoCA : Montreal Cognitive Assessment (Évaluation cognitive de Montréal)

ms : milliseconde
MVCT : Mémoire Visuospatiale à Court Terme
MVDT : Mémoire Visuospatiale De Travail
n : nombre
NIRS : Near-InfraRed Spectroscopy (spectroscopie dans le proche infrarouge)
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PP : Per-Protocol analysis (analyse per-protocole)
QAPPA : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées
s : seconde
ST : Simple-Tâche
SWITCH : exergames assistés par une console grand public
TAP : Test of Attentional Performance (batterie d'évaluation de l'attention)
TM6 : Test de Marche de 6 minutes
TMT : Trail Making Test (test des tracés)
TR : Temps de Réaction
TR 2 : Temps de Réaction à 2 choix
TR 8 : Temps de Réaction à 8 choix
TRAD : TRADitionnel
TUG : Timed Up and Go
UX : User eXperience (expérience utilisateur)
VEGF : Vascular Endothelial Growth Factor
VÉLO-JV : Vélo couplé à des Jeux Vidéo
VIF : Variance Inflation Factor (facteur d'inflation de la variance)
VO_2max : consommation maximale d'oxygène

INTRODUCTION

Les évolutions technologiques ont majoritairement soutenu le désir d'économie et d'efficience de l'homme, réduisant les efforts physiques et cognitifs, parfois au détriment du besoin essentiel de stimulation pour la santé. Par le passé, l'activité physique n'avait pas à être pratiquée de manière volontaire, car la survie imposait le mouvement (e.g., chasser, se déplacer, fuir). Avec la modernisation des modes de vie, largement portée par l'avancée technologique, ces sollicitations physiques et cognitives ont fortement diminué au XXe siècle, et plus encore au XXIe siècle (e.g., voiture, GPS, appareils électroménagers). En 2022, 31 % de la population adulte mondiale était inactive physiquement, soit 5 points de pourcentage de plus qu'en 2010 (Strain et al., 2024). Cette tendance s'accentue après 60 ans, alors même que la pratique régulière d'une activité physique constitue un déterminant essentiel du vieillissement en bonne santé. En France, la part des personnes âgées connaît une progression marquée, passant de 16 % en 2005 à 28 % en 2025 (Insee, 2024)[1], notamment du fait de l'allongement de l'espérance de vie [84,2 ans pour les hommes et 88,1 ans pour les femmes à 65 ans en 2022 (DREES, 2023)[2]]. Toutefois, ces années supplémentaires ne sont pas toutes vécues en bonne santé : à 65 ans, l'écart entre l'espérance de vie avec et sans incapacité est de 9 ans chez les hommes et de 11,3 ans chez les femmes (DREES, 2023). Dans ce contexte, marqué à la fois par le vieillissement démographique et la progression de l'inactivité physique, la Stratégie nationale Sport-Santé 2025-2030 fait de la « prévention de la perte d'autonomie des personnes avançant en âge par le sport-santé » un objectif prioritaire, confortant l'intérêt du développement et de l'évaluation de programmes d'activité physique préventifs.

De nombreux chercheurs référents dans le domaine du bien-vieillir, tels que Fissler (2013), Herold (2018), Kraft (2012) et leurs collaborateurs poursuivent un objectif commun : identifier l'intervention optimale pour les personnes âgées à travers la combinaison de stimulations physique et/ou motrice et/ou cognitive. Effectivement, si les entraînements centrés sur une modalité (e.g., entraînements physique, moteur ou cognitif seuls) se révèlent efficaces, les approches combinées pourraient offrir des bénéfices cognitifs supérieurs (Gavelin et al., 2021) grâce à un effet de synergie (Fissler et al., 2013). De plus, l'entraînement combiné présente un intérêt particulier dans la mesure où il est supposé améliorer aussi bien les domaines physique, moteur que cognitif. Parmi ces approches

[1] Insee : Institut national de la statistique et des études économiques.

[2] DREES : Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques.

combinées, l'entraînement simultané, par opposition à l'entraînement séquentiel, apparaît comme la stratégie la plus pertinente. Le modèle proposé par Herold et al. (2018), qui distingue les modalités additionnelle (*Thinking While Moving* : stimulations motrice et cognitive dissociées) et incorporée (*Moving While Thinking* : stimulations motrice et cognitive intégrées), a ouvert de nouvelles perspectives de recherche sur le design de ces programmes. L'entraînement incorporé serait plus efficace, cependant, il n'y a pas de preuve empirique établie à ce jour, étant donné le faible nombre d'études comparant directement les modalités incorporée et additionnelle (Eggenberger et al., 2015).

Ces modèles théoriques, détaillés dans cette thèse, émergent en parallèle du développement des nouvelles technologies. Paradoxalement, si la technologie a contribué à l'inactivité physique, elle peut désormais être mobilisée comme outil de prévention, notamment à travers les exergames. Contraction d'« *exercise* » (en français : exercice physique) et de « *games* » (en français : jeux), les exergames sont couramment utilisés en recherche pour engager les personnes âgées dans des entraînements simultanés incorporés. Des dispositifs commerciaux tels que la *Xbox Kinect*, *Dance Dance Revolution* ou la *Nintendo Wii* (remplacée en 2017 par la *Nintendo Switch*) se sont largement diffusés, mais leurs bénéfices apparaissent contrastés, limités par un manque d'intensité physique et/ou de complexité motrice (Gallou-Guyot et al., 2020). De nouvelles innovations technologiques, comme les Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I), cherchent à pallier ces limites et présentent plusieurs atouts : immersion, sollicitation physique modérée à intense, complexité motrice, stimulation cognitive et interactions sociales. Ces dispositifs constituent un outil d'entraînement multi-domaine (physique, moteur, cognitif) ayant présenté de premiers résultats prometteurs chez les personnes âgées (Béraud-Peigné et al., 2024). En parallèle, des environnements naturels pourraient également constituer une alternative intéressante, mais les entraînements incorporés réalisés sans nouvelles technologies sont peu évalués en recherche.

L'enjeu principal de cette thèse est d'établir quelles stratégies d'entraînement simultané sont les plus efficaces, en analysant leurs effets par rapport aux entraînements physique, cognitif et à une condition contrôle inactive. Plus particulièrement, elle s'appuie sur le modèle d'Herold et al. (2018), qui distingue les entraînements incorporé et additionnel. Ce modèle a toutefois été élargi afin de considérer la diversité des formes que peut prendre l'entraînement incorporé. En effet, ce dernier ne constitue pas une entité homogène : ses effets peuvent différer selon l'environnement (naturel vs virtuel), la complexité motrice des tâches ou encore le type d'exergame mobilisé. Ainsi, cette thèse poursuit trois objectifs principaux : 1) comparer l'efficacité de l'entraînement simultané aux entraînements physique et cognitif isolés, ainsi qu'à une condition contrôle inactive, 2) examiner les différences d'effets entre les modalités

simultanées incorporée et additionnelle, 3) explorer les variations au sein même de l'entraînement incorporé afin d'identifier les facteurs susceptibles d'influencer ses effets. Ce travail doctoral s'intéresse principalement aux effets cognitifs, qui constituent le fil directeur de la réflexion, mais adopte tout de même une approche multidimensionnelle, intégrant également des mesures physiques, motrices et de Double-Tâche (DT). Enfin, la question de la méthode d'évaluation et de l'expérience globale face aux exergames occupe une place importante dans ce travail, en tant que levier essentiel de compréhension et d'optimisation de l'efficacité des programmes.

Afin de situer cette thèse dans la littérature, un cadre théorique sera d'abord présenté en quatre parties. La première partie abordera les effets du vieillissement sur les capacités physiques et motrices, ainsi que les modèles classiques du vieillissement cognitif. La deuxième partie proposera des approches contemporaines et fonctionnelles de l'évaluation physique et cognitive, introduisant notamment le concept de DT, en soulignant la nécessité de faire émerger de nouvelles méthodes. La troisième partie analysera les effets des entraînements isolés (physique, moteur, cognitif), avec un focus sur les jeux vidéo. Enfin, la quatrième partie apportera un cadre méthodologique et empirique concernant l'entraînement combiné, avec un accent spécifique sur les entraînements simultané et incorporé, les exergames et les activités motrices et cognitives complexes. La problématique générale sera ensuite exposée, suivie de la présentation des cinq études expérimentales menées dans le cadre de cette thèse. Les trois premières constitueront des travaux préliminaires : développement de tests cognitifs et de DT (études 1 et 2), puis analyse de l'expérience globale des exergames (étude 3). L'étude principale (étude 4) évaluera les effets de l'entraînement simultané, et l'étude 5 examinera la rétention des effets trois mois après l'arrêt de l'entraînement. Enfin, la discussion générale clôturera le manuscrit. Elle proposera une analyse transversale des cinq études, réinterrogera notamment la notion d'efficacité et ouvrira de nouvelles perspectives de recherche.

PARTIE 1

Cadre théorique

CHAPITRE 1 – VIEILLISSEMENT ET CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES ET COGNITIVES

Ce chapitre aborde succinctement l'impact du vieillissement normal sur les capacités physiques et motrices avant de décrire ses effets sur les fonctions cognitives, à la lumière des principaux modèles théoriques du vieillissement, en mettant l'accent sur les mécanismes cognitifs et la possibilité d'enrichissement, sujet central de cette thèse. Ce chapitre traite également des interactions entre les dimensions cognitive et corporelle (physique et moteur).

1. EFFETS DU VIEILLISSEMENT SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES ET MOTRICES

Le vieillissement entraîne des altérations progressives des capacités physiques et motrices. Une distinction conceptuelle est généralement établie entre ces deux types de capacités (C. Bouchard et al., 2012 ; Caspersen et al., 1985 ; Riebe et al., 2018). Les capacités physiques renvoient aux aptitudes corporelles fondamentales nécessaires à la production d'efforts, telles que la force et la puissance musculaire, ainsi que l'endurance cardiovasculaire (Netz, 2019). Les capacités motrices, quant à elles, désignent l'aptitude à coordonner, ajuster et contrôler les mouvements du corps en mobilisant de manière intégrée les muscles, les articulations, les systèmes sensoriels et les mécanismes de régulation nerveuse, à la fois centraux et périphériques. Elles incluent des composantes telles que la coordination motrice, l'équilibre postural, la précision du geste, ainsi que la souplesse. Les capacités motrices renvoient aux habiletés motrices, c'est-à-dire à des séquences organisées et coordonnées de mouvements volontaires du corps, de la tête et/ou des membres, dirigés vers un objectif précis. Elles sont généralement divisées en fonction de l'implication musculaire nécessaire pour les exécuter : les habiletés motrices globales[1] (e.g., mouvement de tout le corps ou de plusieurs membres) et les habiletés motrices fines (e.g., écriture, manipulation d'objets), toutes deux susceptibles d'être altérées avec l'âge (Voelcker-Rehage, 2008). La complexité des habiletés peut être définie en fonction du temps nécessaire pour les acquérir (i.e., d'une session à plusieurs séances), du nombre de degrés de liberté nécessaires et de la proportion de sous-systèmes ou de capacités impliquées (Voelcker-Rehage, 2008).

[1] Par souci de concision, dans cette thèse, le terme « habiletés motrices complexes » est utilisé pour désigner les habiletés motrices globales et complexes.

Le vieillissement s'accompagne d'une dégradation progressive de plusieurs systèmes physiologiques. Le système cardiovasculaire est altéré, ce qui se traduit par une diminution de la capacité maximale aérobie. Des études longitudinales ont montré une diminution du VO_2max[1] de 20 à 25 % par décennie chez les personnes âgées en bonne santé de plus de 70 ans (Fleg et al., 2005 ; Hollenberg et al., 2006). De plus, l'avancée en âge s'accompagne d'une augmentation de la masse grasse et d'une réduction de la masse musculaire squelettique, phénomène désigné sous le nom de sarcopénie (Goodpaster et al., 2006). Cette perte musculaire est associée à une diminution de la force et de la performance physique, ce qui accroît le risque de chutes et de perte d'autonomie. Le système neuromusculaire est également affecté. Des altérations des performances neuromusculaires ont été observées (Doherty et al., 1993), caractérisées par une diminution de la force, de la puissance et de la qualité musculaire (D. R. Bouchard et al., 2011 ; Goodpaster et al., 2006). Ces déficits sont en partie dus à des modifications neurophysiologiques (e.g., ralentissement de la conduction nerveuse, perte de neurones moteurs) affectant la fluidité, la coordination et l'adaptation des mouvements (Seidler et al., 2010). Les muscles des membres inférieurs, essentiels à la locomotion et à la stabilité posturale, sont particulièrement touchés (Izquierdo et al., 1999). En effet, la diminution de la force musculaire est corrélée à un déclin des performances fonctionnelles (Bassey et al., 1988), notamment de l'équilibre (Fukagawa et al., 1995). L'équilibre est également affecté par la perturbation des systèmes vestibulaire, sensoriel et proprioceptif (Cuevas-Trisan, 2017). Il constitue pourtant un enjeu majeur chez les personnes âgées, car sa détérioration augmente le risque de chutes, souvent à l'origine de fractures ou d'autres blessures graves. L'ensemble de ces altérations contribue à la dégradation des capacités fonctionnelles et à une hausse des incapacités physiques, compromettant ainsi l'autonomie des personnes âgées. En effet, de nombreuses activités quotidiennes (e.g., se lever d'une chaise, monter des escaliers, porter des sacs de courses) nécessitent des capacités physiques et motrices adéquates. Chez de nombreuses personnes âgées, la réalisation de ces tâches peut devenir difficile, voire impossible. Enfin, ces limitations physiques peuvent être exacerbées par le déclin cognitif lié à l'âge, notamment lorsqu'il s'agit d'habiletés complexes requérant de l'attention, de la planification ou d'une situation de DT.

En vieillissant, les habiletés motrices complexes sont exécutées plus lentement, et, dans certains cas, avec moins de précision (Voelcker-Rehage, 2008). La capacité d'apprentissage est cependant

[1] La VO_2max reflète le point pour lequel la consommation maximale d'oxygène d'un individu reste constante malgré une augmentation de la charge de travail (Buttar et al., 2019). Elle représente la mesure la plus utilisée et précise pour évaluer la capacité cardio-respiratoire.

conservée, bien que réduite, celle-ci étant associée aux fonctions sensorielles (ouïe, vision) et cognitives (mémoire, vitesse, connaissances). La phase initiale d'apprentissage est majoritairement influencée par les processus cognitifs (compréhension de la tâche, préparation de stratégies) (Voelcker-Rehage, 2008).

Le maintien de la pratique d'activités physiques tout au long de la vie permettrait de développer une plus grande réserve fonctionnelle, favorisant la préservation des capacités physiques et motrices jusqu'à un âge avancé. Les effets du vieillissement restent perceptibles, même pour ceux qui s'engagent dans une pratique physique soutenue tout au long de leur vie (Paterson & Warburton, 2010), bien que les capacités physiques et motrices conservent une certaine malléabilité et puissent être renforcées, y compris chez les personnes âgées, à condition d'interventions adaptées et ciblées. Les altérations physiques et motrices liées au vieillissement ne surviennent pas isolément, mais s'inscrivent en parallèle d'un déclin progressif des capacités cognitives.

2. LE VIEILLISSEMENT COGNITIF

2.1. Modèles théoriques du vieillissement cognitif

Le cerveau, comme tous les autres organes du corps, subit un vieillissement naturel. Ce processus s'accompagne de modifications anatomiques (e.g., mort neuronale, réduction de la substance blanche, baisse du débit sanguin cérébral) et physiologiques (e.g., diminution de la synthèse des neurotransmetteurs, perte d'efficacité des échanges synaptiques), qui altèrent le fonctionnement cognitif global (Fjell & Walhovd, 2010 ; West, 1996). Étant donné l'importance des mécanismes impliqués dans l'efficacité cognitive, une section sera dédiée au vieillissement neurocardiovasculaire (partie 2.2). Cependant, celle-ci n'a pas pour vocation d'être exhaustive sur ce sujet puisque cette thèse s'intéresse principalement aux modifications comportementales. En effet, le vieillissement cognitif se traduit également par des changements comportementaux, observables notamment à travers une diminution des performances cognitives. Le terme « cognitif » renvoie aux mécanismes mentaux impliqués dans l'acquisition, le traitement et l'utilisation des connaissances. Les fonctions cognitives permettent ainsi de recevoir, sélectionner, stocker, transformer et restituer les informations issues de l'environnement. Elles englobent des domaines variés tels que la mémoire, le langage, ainsi que les fonctions exécutives, qui orchestrent la régulation et la planification des activités cognitives complexes.

Plusieurs modèles théoriques ont été proposés pour expliquer les effets du vieillissement sur la cognition. Parmi eux, le modèle de limitation des ressources, initialement proposé par Craik et Byrd (1982), demeure l'un des plus influents aujourd'hui. Il postule que la quantité limitée de ressources disponibles décline progressivement avec l'avancée en âge. Trois hypothèses, compatibles avec le

modèle de limitation des ressources et partiellement chevauchantes, ont été développées pour expliquer les mécanismes à l'origine du déclin cognitif lié à l'âge : i) l'hypothèse des capacités en mémoire de travail, ii) l'hypothèse de la vitesse de traitement et iii) l'hypothèse du contrôle exécutif. Ces perspectives ne sont ni mutuellement exclusives ni strictement équivalentes, mais convergent vers l'idée d'une diminution progressive des ressources et de l'efficacité du traitement de l'information avec l'avancée en âge.

2.1.1. L'hypothèse des capacités en mémoire de travail

Cette hypothèse s'inscrit dans le cadre plus large du modèle de limitation des ressources, en indiquant que la mémoire de travail, essentielle pour le stockage et le traitement temporaire des informations et impliquée dans la plupart des activités quotidiennes, est spécifiquement affectée par la diminution des ressources cognitives disponibles (e.g., Borella et al., 2008 ; Craik & Byrd, 1982 ; Van Der Linden et al., 1994). Des études suggèrent que le vieillissement affecte surtout la quantité d'informations disponibles en mémoire de travail, plutôt que l'accès aux informations stockées (Belleville et al., 1998 ; Oberauer et al., 2003 ; Van Der Linden et al., 1994).

2.1.2. L'hypothèse de la vitesse de traitement

L'hypothèse de la vitesse de traitement (*processing speed theory*), proposée par Salthouse (1996), complète le modèle de Craik et Byrd (1982), en insistant sur le rôle du ralentissement cognitif global. Elle postule que les déclins cognitifs liés à l'âge s'expliquent par un ralentissement généralisé du traitement cognitif des informations. Ce ralentissement limite la capacité à effectuer plusieurs opérations mentales dans un temps donné, ce qui réduit l'efficacité des ressources disponibles. Il a été démontré dans plusieurs domaines cognitifs, comme la mémoire de travail (Salthouse & Babcock, 1991), la mémoire à long terme (Bryan & Luszcz, 1996 ; Salthouse, 1993), des tâches de rotation spatiale et de raisonnement, (Lindenberger et al., 1993), et plus généralement les fonctions exécutives (Salthouse, 2005), que les performances dépendraient de la rapidité du traitement de l'information.

2.1.3. L'hypothèse du contrôle exécutif

Cette hypothèse postule que le déclin cognitif est principalement lié à une altération du contrôle exécutif, considéré comme une caractéristique essentielle du vieillissement cognitif normal (Crawford et al., 2000 ; West, 1996). Les fonctions exécutives regroupent un ensemble de processus cognitifs impliqués dans la planification, l'organisation et l'adaptation du comportement, qui permettent le contrôle et l'exécution de tâches complexes, nouvelles ou non routinières. Leur déclin peut avoir des

conséquences comportementales, notamment sur l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne et constitue un facteur prédictif d'une éventuelle démence (Amieva et al., 2003). Le modèle de Miyake et al. (2000), probablement le plus utilisé actuellement dans la littérature, identifie trois composantes centrales des fonctions exécutives : i) l'inhibition (capacité à inhiber des réponses automatiques ou non pertinentes), ii) la mise à jour de la mémoire de travail (capacité à surveiller et actualiser le contenu de la mémoire de travail) et iii) la flexibilité mentale (capacité à passer d'un ensemble de règles, tâches ou représentations mentales à un autre). Des modèles plus larges (e.g., Cipolotti & Warrington, 1995 ; Godefroy, 2012) ajoutent d'autres variables, comme par exemple la planification (capacité à organiser une séquence d'actions pour atteindre un but).

Ces hypothèses ne s'excluent pas mutuellement et peuvent coexister pour rendre compte du déclin des performances cognitives lié à l'âge. Elles offrent des éclairages complémentaires sur les mécanismes du vieillissement cognitif, bien qu'elles reposent sur une vision généralisante du vieillissement, qui tend à négliger la variabilité intra et inter-individuelle. D'autres modèles, tels que l'hypothèse de la dédifférenciation (Baltes & Lindenberger, 1997) ou le modèle HAROLD[1] (Cabeza, 2002), apportent un éclairage complémentaire, en s'appuyant davantage sur des données neurofonctionnelles ou sur des mécanismes compensatoires globaux. Ces modèles ne seront pas détaillés ici, car ils s'inscrivent dans une perspective plus large, moins centrée sur les processus cognitifs spécifiques mesurés dans cette étude. Le modèle de la réserve cognitive (Y. Stern, 2002, 2009), quant à lui, est abordé dans la partie 2.3.2 de ce chapitre, car il permet d'éclairer les différences inter-individuelles face au vieillissement, et d'envisager des méthodes d'entraînement, telles que les entraînements physique, cognitif ou combiné, notamment sous un angle préventif.

2.2. Vieillissement neurocardiovasculaire

Les fonctions cognitives sont influencées par de nombreux facteurs physiologiques, en particulier par les mécanismes cardiovasculaires, mettant en lumière le lien entre les dimensions physique et cognitive. Le vieillissement s'accompagne de modifications structurelles et fonctionnelles du système cardiovasculaire, notamment une augmentation de la rigidité des parois ventriculaires cardiaques et artérielles. Cette rigidification affecte la perfusion des organes, y compris le cerveau (Fisher et al., 2013 ; Leenders et al., 1990). Elle est associée à une élévation progressive de la pression artérielle moyenne, liée à une activité sympathique accrue et à une altération de la vasodilatation périphérique.

[1] HAROLD : *Hemispheric Asymmetry Reduction in Older ADults*.

Le vieillissement s'accompagne également d'une diminution du débit sanguin cérébral (Leenders et al., 1990 ; Lu et al., 2011), phénomène crucial car le fonctionnement cérébral dépend fortement d'un apport sanguin constant en oxygène et en nutriments. Les régions les plus touchées seraient le cortex préfrontal, le cortex insulaire et le noyau caudé (Lu et al., 2011). À cela s'ajoute une réduction de l'oxygénation cérébrale.

Parallèlement, le processus d'angiogenèse, c'est-à-dire la formation de nouveaux vaisseaux sanguins, est également affecté. L'un des principaux médiateurs de l'angiogenèse cérébrale est le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF, *Vascular Endothelial Growth Factor*), une protéine angiogénique aux fonctions neuroprotectrices et neurotrophiques (Lin et al., 2018). Le VEGF peut être synthétisé et libéré à la fois par les cellules endothéliales vasculaires périphériques et par les cellules cérébrales. Cependant, sa production est diminuée avec l'âge, ce qui entraîne une réduction de la densité capillaire et de l'activité angiogénique, notamment en réponse à l'exercice physique (Ryan et al., 2006). Ces altérations limitent la capacité du cerveau à maintenir une vascularisation optimale, essentielle au bon fonctionnement cognitif. L'ensemble de ces modifications contribue au vieillissement neurocardiovasculaire, susceptible de compromettre la perfusion cérébrale et de participer au déclin cognitif lié à l'âge.

2.3. Impact du vieillissement sur les fonctions cognitives

2.3.1. La variabilité intra-individuelle

Bien que le vieillissement soit un processus affectant tous les individus, ses conséquences sont complexes, hétérogènes et variables. Elles varient d'un individu à l'autre (i.e., variabilité inter-individuelle) ainsi qu'au sein même des différentes fonctions de l'organisme (i.e., variabilité intra-individuelle). La littérature sur la variabilité intra-individuelle souligne que l'ensemble des habiletés cognitives n'est pas touché de façon égale au cours du vieillissement (Baltes & Willis, 1982).

Il est communément admis que le vieillissement s'accompagne du déclin de plusieurs fonctions cognitives majeures. Par exemple, les capacités visuospatiales (Koss et al., 1991) et la vitesse de traitement de l'information déclinent tout au long de l'âge adulte (Garcia-Cabello et al., 2021). Parmi les fonctions les plus sensibles au vieillissement figurent les fonctions exécutives, principalement en raison de la vulnérabilité précoce des régions frontales qui les sous-tendent (Raz, 2000 ; West, 1996). Ces dernières sont particulièrement sujettes à divers mécanismes dégénératifs naturels, tels que la perte neuronale, la dégénérescence axonale ou la diminution du flux sanguin cérébral (e.g., Raz, 2000 ; West, 1996). En conséquence, les fonctions exécutives sont les capacités cognitives les plus fortement et

précocement affectées par l'avancée en âge. Comprendre les mécanismes impliqués dans ces altérations exécutives est donc essentiel pour mieux cibler les stratégies de prévention. Par ailleurs, le vieillissement se caractérise également par le maintien relatif de certaines d'entre elles. Par exemple, les habiletés procédurales (Howard, 1988), bien qu'elles se désautomatisent, ainsi que la mémoire sémantique (Park et al., 1996), restent relativement stables en vieillissant.

2.3.2. La variabilité inter-individuelle

La littérature sur la variabilité inter-individuelle a mis en évidence que l'évolution du fonctionnement cognitif ne suit pas toujours un schéma unique selon les individus. En effet, certaines personnes conservent très longtemps un niveau élevé d'efficacité, tandis que d'autres présentent un déclin précoce et/ou accentué, dans un ou plusieurs domaines cognitifs (e.g., Ylikoski et al., 1999). La Figure 1 représente les différentes trajectoires de développement cognitif possibles au cours de la vie (adaptée depuis Hertzog et al., 2009) et met en évidence le concept de réserve cognitive (Y. Stern, 2002, 2009).

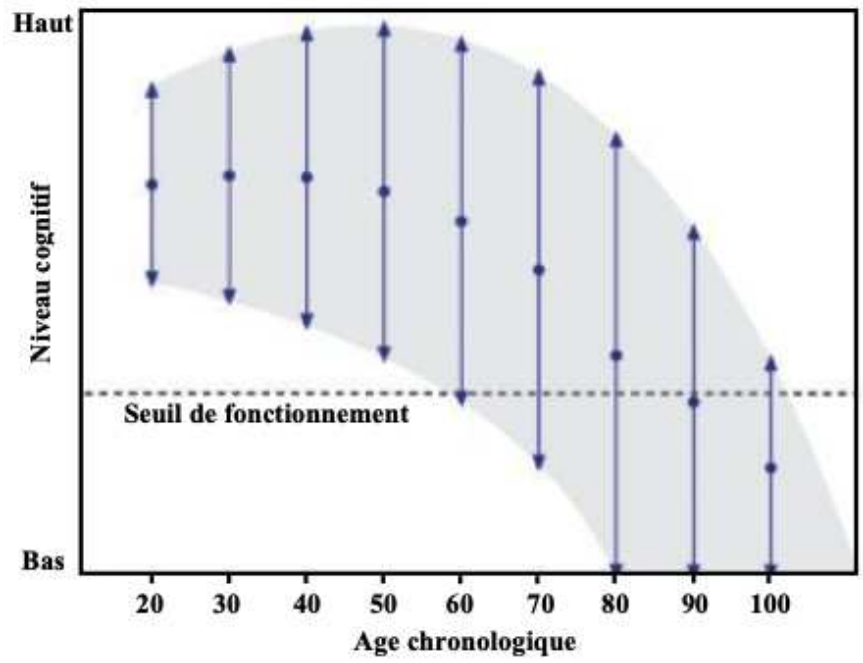


Figure 1. Représentation du potentiel de développement cognitif au cours de la vie
(adaptée d'après Hertzog et al., 2009)

Au début de l'âge adulte, un individu présente un éventail de niveaux possibles de fonctionnement cognitif, déterminé par son développement antérieur. Ce potentiel comprend une limite inférieure et supérieure, qui diminuent progressivement avec l'âge à partir de 50 ans. Les flèches

verticales illustrent la plasticité cognitive (terme défini par la suite) disponible à chaque âge, tandis que la ligne pointillée horizontale indique un seuil de fonctionnement critique en deçà duquel un individu devient dépendant sur le plan fonctionnel, comme dans le cas de certaines pathologies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer.

Ainsi, en fonction de son niveau cognitif et de son environnement, un individu peut théoriquement se situer en dessous de ce seuil avant 60 ans ou après 100 ans. Cette malléabilité du niveau cognitif s'explique par la plasticité cognitive, définie comme la capacité du cerveau à modifier l'organisation de ses réseaux neuronaux en fonction des expériences vécues (e.g., apprentissage, entraînement, adaptation aux changements environnementaux), permettant ainsi un enrichissement ou un affaiblissement des capacités cognitives. Cette plasticité s'exprime à la fois au niveau comportemental (i.e., traduite par des scores plus ou moins élevés sur des tests cognitifs) et au niveau cérébral (i.e., changements fonctionnels et structurels observables par neuroimagerie, tels que l'augmentation de la connectivité ou la modification de l'activation cérébrale). Il est possible de distinguer plus précisément deux formes complémentaires de plasticité cérébrale. D'une part, la plasticité neuronale, qui englobe les modifications biologiques telles que la synaptogenèse, la neurogenèse ou l'angiogenèse, et qui constitue le substrat physiologique nécessaire à l'adaptation cognitive. D'autre part, la plasticité fonctionnelle, qui reflète la capacité du cerveau à réorganiser ses réseaux pour compenser les effets de l'âge, par exemple via le recrutement de régions cérébrales alternatives ou supplémentaires lors de la réalisation de tâches cognitives. Ces deux dimensions interagissent étroitement : la plasticité neuronale crée les conditions propices à une compensation fonctionnelle efficace, tandis que la plasticité fonctionnelle traduit l'adaptation effective du système cognitif face aux défis posés par le vieillissement. Elles sont influencées par différents facteurs internes (i.e., développement, maturation, vieillissement, lésions) et externes (i.e., entraînement, enrichissement, substances pharmacologiques).

La diversité des profils cognitifs observés au cours du vieillissement pourrait ainsi s'expliquer, en partie, par l'existence d'un potentiel latent d'amélioration, plus ou moins mobilisé selon les individus et les stimulations environnementales reçues (Y. Stern, 2002, 2009). Comprendre ces dynamiques de plasticité et de réserve est essentiel pour orienter les stratégies de maintien des fonctions cognitives chez les personnes âgées. Dans le cadre de cette thèse, seule l'expression comportementale de la plasticité cognitive à travers l'influence de contraintes externes, ici différents types d'entraînements, est examinée.

2.4. Concept de l'enrichissement cognitif : un modèle dynamique du vieillissement

La variabilité inter-individuelle et la plasticité cognitive soulignent qu'un potentiel de développement cognitif existe, même chez les personnes âgées, permettant de reconsidérer l'idée anachronique d'un vieillissement exclusivement décadent. En effet, l'hypothèse de l'enrichissement cognitif (Hertzog et al., 2009), représentée à travers la Figure 2, stipule que tous les comportements adoptés par un individu au cours de sa vie influencent son fonctionnement cognitif, y compris à un âge avancé (Greenwood & Parasuraman, 2010). Les individus disposent ainsi d'un potentiel d'amélioration, ou, à l'inverse, de déclin, qui se manifeste sous l'influence de différents facteurs, dits modérateurs. Les principaux modérateurs identifiés dans la littérature sont liés au mode de vie : le nombre d'années de scolarité, l'expertise professionnelle, la pratique d'activités de loisirs stimulantes, l'entraînement cognitif, le sommeil et l'activité physique (Fillit et al., 2002 ; Greenwood & Parasuraman, 2010). Le concept d'enrichissement cognitif s'illustre principalement à travers quatre trajectoires développementales du vieillissement cognitif (A, B, C et D), qui reflètent différentes dynamiques possibles de l'évolution des fonctions cognitives tout au long de la vie.

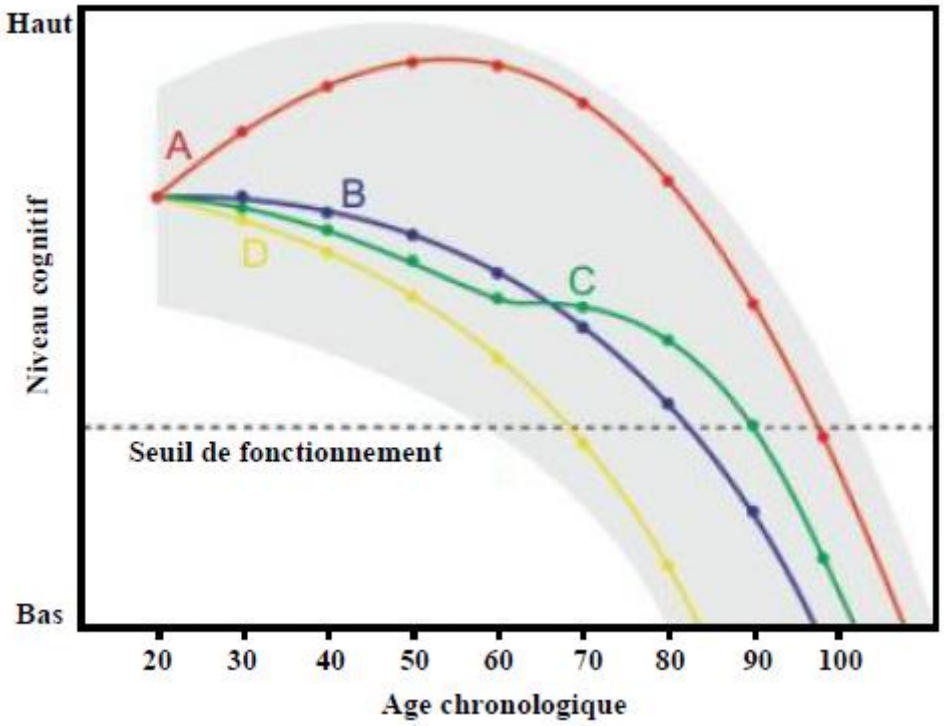


Figure 2. Profils développementaux du vieillissement cognitif selon quatre trajectoires
(adaptée d'après Hertzog et al., 2009)

La trajectoire A correspond à une optimisation maximale du fonctionnement cognitif, proche du niveau de performance le plus élevé possible atteint par l'individu au cours de son développement. Elle se caractérise par un maintien important des fonctions cognitives, rendu possible par l'adoption de

comportements stimulants. Malgré cela, un certain déclin reste observable avec l'avancée en âge. À l'opposé, la trajectoire D reflète une dynamique marquée par des comportements peu favorables, conduisant à une diminution rapide et importante des capacités cognitives. Entre ces deux extrêmes, les trajectoires B et C représentent des profils intermédiaires, caractérisés respectivement par un vieillissement cognitif typique (trajectoire B) et par un enrichissement des capacités cognitives (trajectoire C). Cette dernière illustre le fait que, même à un âge avancé, une amélioration des fonctions cognitives est envisageable, à condition d'intégrer dans son mode de vie des activités stimulantes (e.g., activité physique, entraînement cognitif) jusque-là absentes ou trop peu régulières, que ce soit en augmentant leur diversité, leur durée ou leur fréquence. Par ailleurs, l'évolution différenciée de la trajectoire C, par rapport à la trajectoire B, suggère également un impact à long terme sur les capacités fonctionnelles. Elle laisse entrevoir des bénéfices durables susceptibles de contribuer à retarder l'entrée dans la dépendance, représentée par une ligne horizontale correspondant au seuil de fonctionnement. Ainsi, elle met également en lumière l'intérêt d'évaluer la durabilité des effets (effet de rétention) d'un changement de comportement. Il est important de souligner que ces trajectoires de développement sont à considérer comme des modèles hypothétiques. Elles offrent une illustration simplifiée du concept d'enrichissement cognitif, en négligeant toutefois les différences intra-individuelles du développement cognitif abordées précédemment.

Le concept d'enrichissement cognitif est étroitement lié à la perspective dite du « *disuse* », souvent résumée par l'adage « *use it or lose it* » (« utilise-le ou perds-le ») (Hultsch et al., 1999). Selon cette approche explicative du vieillissement cognitif, le déclin des capacités résulterait d'un manque d'utilisation des systèmes cognitifs, entraînant ainsi une baisse progressive des performances (Marquié & Isingrini, 2001). Cette perspective met en évidence l'importance de la stimulation cognitive, soulignant l'influence des expériences et des contextes environnementaux dans l'atténuation du déclin lié à l'âge. Une implication active dans des activités stimulantes favoriserait une meilleure stabilité des performances, soit en maintenant (voire en améliorant) les habiletés initiales (Ericsson & Charness, 1994 ; Hultsch et al., 1999), soit en mobilisant des mécanismes compensatoires (Dixon & Bäckman, 1995). Ainsi, les individus engagés régulièrement dans diverses activités mobilisent plus largement leurs ressources cognitives, ce qui contribue au maintien ou à l'amélioration de leurs capacités. Ces schémas d'engagement sont directement liés aux trajectoires développementales évoquées précédemment. Ils renforcent l'idée selon laquelle le vieillissement cognitif est un processus dynamique et en partie modifiable, influencé par l'environnement et les comportements adoptés tout au long de la vie.

Synthèse du chapitre 1

Ce premier chapitre met en évidence l'impact du vieillissement sur les capacités physiques, motrices et cognitives. Il souligne également la présence d'une variabilité intra et inter-individuelle, reflétant les perspectives d'amélioration possibles, même à un âge avancé, grâce à l'entraînement. Les preuves actuelles suggèrent que les altérations physiques et cognitives sont liées (Clouston et al., 2013). Par exemple, un lien a été démontré entre les capacités exécutives et l'équilibre (Divandari et al., 2024), une baisse des performances cognitives prédit un déclin de la vitesse de marche (Best et al., 2016), et inversement une vitesse de marche plus lente précède le déclin cognitif (Mielke et al., 2013). Un nombre croissant de recherches confirme cette interrelation entre le traitement cognitif et l'équilibre ainsi que la marche, chez les adultes âgés (K. Z. H. Li et al., 2018 ; Montero-Odasso et al., 2012). Ces données suggèrent que les changements liés à l'âge dans les deux domaines pourraient être gouvernés par un même processus. En particulier, les fonctions exécutives et le contrôle attentionnel ont été étudiés en lien avec l'instabilité posturale, montrant qu'à mesure que les fonctions exécutives déclinent avec l'âge, la marche et l'équilibre deviennent moins automatisés et plus coûteux sur le plan cognitif (Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Cette relation est particulièrement visible dans les paradigmes de Double-Tâche (DT) cognitivo-motrice, définis et détaillés dans le prochain chapitre, avec une diminution de la capacité à réaliser ces deux types de tâches conjointement, en vieillissant (Schaefer & Schumacher, 2011).

CHAPITRE 2 – VERS UNE ÉVALUATION PLUS ÉCOLOGIQUE ET FONCTIONNELLE

Alors que le chapitre 1 s'appuie sur des modèles classiques de la cognition et du vieillissement, le chapitre 2 introduit des approches plus contemporaines et fonctionnelles de l'évaluation physique et cognitive auprès des personnes âgées. Il met l'accent sur des méthodes d'évaluation cognitive plus proches des situations rencontrées dans la vie quotidienne, avec un intérêt particulier pour les capacités de Double-Tâche (DT). Par ailleurs, les tests actuels restent souvent éloignés des contraintes du quotidien et présentent certaines limites détaillées dans ce chapitre.

Ce chapitre se divise en deux grandes parties. La première propose une revue des modèles théoriques et des effets d'interférence liés à la réalisation simultanée de plusieurs tâches, ainsi qu'une analyse des effets du vieillissement sur ces performances. La seconde présente les outils d'évaluation cognitive et des capacités de DT actuellement utilisés et leurs limites, puis explore de nouvelles pistes de développement. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les leviers d'action dans la construction d'outils d'évaluation à la fois plus sensibles et plus représentatifs des enjeux d'autonomie.

1. LES CAPACITÉS DE DOUBLE-TÂCHE

1.1. Définition et modèles

Les activités de la vie quotidienne requièrent couramment la réalisation simultanée de deux tâches, comme marcher en parlant ou monter les escaliers tout en envoyant un message. Ce type de situation correspond à la DT. Pour qu'une situation soit qualifiée de DT, chaque tâche qui la compose doit pouvoir être réalisée indépendamment, mesurée séparément et viser des objectifs distincts (McIsaac et al., 2015). La difficulté à effectuer deux tâches simultanément s'explique par l'interférence qu'elles peuvent générer, notamment lorsqu'elles mobilisent des sous-systèmes fonctionnels et/ou cérébraux identiques (Pashler, 1994). Deux théories principales, concurrentes mais complémentaires, tentent d'expliquer les mécanismes à l'origine de l'interférence en DT : le modèle du goulot d'étranglement (*bottleneck theory*) et le modèle du partage de capacité (*capacity sharing*).

1.1.1. Modèle du goulot d'étranglement

Le modèle du goulot d'étranglement postule l'existence d'un mécanisme central unique de sélection de réponse, auquel une seule tâche peut accéder à la fois. Ainsi, les coûts associés à la DT

surviennent parce qu'une seule opération de traitement de l'information peut être réalisée à un moment donné (Pashler, 1994). Ce modèle repose principalement sur les résultats issus du paradigme de la Période Réfractaire Psychologique (PRP) : lorsque deux stimuli sont présentés à un intervalle court, le temps de réaction à la seconde tâche augmente, traduisant une interruption temporaire du traitement. Le goulot est localisé au niveau de la sélection de la réponse, alors que les étapes perceptives ou sémantiques peuvent, dans certains cas, être traitées en parallèle. Ainsi, la seconde tâche doit attendre que la première soit terminée, ce qui engendre un coût temporel. Dans ce cadre, l'interférence entre les tâches, tout comme le vieillissement cognitif, affecte principalement la seconde tâche, en prolongeant la durée d'occupation du goulot. Ce modèle strictement sériel du traitement a toutefois été remis en question par des données montrant des possibilités de traitement parallèle, ce qui a conduit au développement de modèles alternatifs, comme le modèle de partage de capacité (Kahneman, 1973 ; Tombu & Jolicoeur, 2003).

1.1.2. Modèle du partage de capacité

Le modèle du partage de capacité considère, quant à lui, que plusieurs traitements peuvent s'opérer en parallèle, mais que la capacité centrale de traitement est limitée (Kahneman, 1973 ; Tombu & Jolicoeur, 2003). L'individu doit donc allouer ses ressources de manière stratégique entre les tâches, cette allocation pouvant être volontaire ou influencée par les caractéristiques propres aux tâches (Tombu & Jolicoeur, 2003). Lorsque les deux tâches ont des besoins en attention qui n'excèdent pas la quantité disponible de ressources, les traitements sous-jacents peuvent s'effectuer efficacement, aussi bien en DT qu'en Simple-Tâche (ST). En revanche, si la somme des besoins attentionnels dépasse les ressources disponibles, certaines tâches (voire l'ensemble) seront traitées de manière sous-optimale. Cela peut se manifester par un allongement des temps de réaction, une augmentation du nombre d'erreurs ou une diminution de la précision. La demande attentionnelle dépend également de la nature de la tâche : une tâche familière ou simple mobilisera peu d'attention, tandis qu'une tâche nouvelle, complexe ou non automatisée en demandera davantage. Dans cette perspective, le traitement sériel décrit par le modèle du goulot d'étranglement est interprété non pas comme une contrainte fixe du système cognitif, mais comme une stratégie de gestion des ressources adoptée par l'individu (Miller et al., 2009 ; Rubinstein et al., 2001 ; Tombu & Jolicoeur, 2003). Ce modèle rend compte des effets du vieillissement : la réduction des ressources disponibles accroît les coûts en DT, souvent pour les deux tâches, en cohérence avec un partage de capacité.

1.2. Caractéristiques de la double-tâche

1.2.1. L'effet de double-tâche : définition et mesures

Les tâches composant une DT peuvent être de nature motrice/physique[1] et/ou cognitive, créant trois catégories de DT : cognitivo-motrice, cognitivo-cognitive et motrice-motrice. Cette thèse s'intéresse particulièrement à la DT cognitivo-motrice mais porte également sur la DT cognitivo-cognitive. L'exécution simultanée de deux tâches entraîne une modification de la performance d'une ou des deux tâches (Fallahtafti et al., 2021). Étant donné qu'il ne s'agit pas nécessairement d'une diminution, il convient de parler d'effet de la double-tâche (DTE, *Dual Task Effect*) plutôt que d'interférence (DTC, *Dual-Task Cost*). Son ampleur et sa direction (i.e., facilitation ou diminution) dépendent de l'interaction entre les deux tâches, y compris la manière dont les individus priorisent spontanément leur attention. Plusieurs possibilités existent pour calculer le DTE. Le calcul traditionnel (Fallahtafti et al., 2021 ; Gallou-Guyot et al., 2025 ; K. Z. H. Li et al., 2018) du DTE est :

$$DTE = \frac{DT - ST}{ST}$$

Équation 1. Effet de la double-tâche

Note. *DT : Double-Tâche ; DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche) ; ST : Simple-Tâche.*

Le signe est inversé lorsque des valeurs plus élevées indiquent une performance moins bonne (e.g., temps de réaction)[2].

Le modèle proposé par Plummer et al. (2013) illustre les schémas de DTE possibles sur les performances motrice et cognitive (Figure 3). Il a été développé dans le cadre de tâches cognitivo-motrices, mais il s'applique également aux autres types de DT (e.g., DT cognitivo-cognitive). Les interactions des deux tâches peuvent prendre différentes formes allant d'une dégradation mutuelle des performances (i.e., interférence mutuelle) à une amélioration conjointe (i.e., facilitation mutuelle). La zone « sans interférence » est définie arbitrairement dans ce modèle : elle correspond à une situation où la performance dans les deux tâches reste inchangée par rapport à leur exécution en ST. En dehors de cette zone, différents profils peuvent émerger selon que la performance d'une ou des deux tâches en DT

[1] La tâche peut être de nature physique ou motrice, selon les définitions de ces termes données dans la partie 1 du chapitre 1. Pour des raisons de clarté, et en accord avec les termes employés par les auteurs du domaine (e.g., Gallou-Guyot et al., 2020 ; Plummer et al., 2013), nous utiliserons uniquement le terme moteur pour qualifier la tâche physique/motrice qui compose la DT.

[2] Dans le cas particulier où il est possible d'obtenir un score nul en ST, il faudra utiliser d'autres indicateurs que le score de l'individu en ST, comme la moyenne du groupe en ST par exemple.

s'améliore ou se détériore par rapport à la réalisation en ST. Ce cadre permet de mieux comprendre les stratégies déployées par les individus et les compromis qu'ils opèrent en situation de DT.

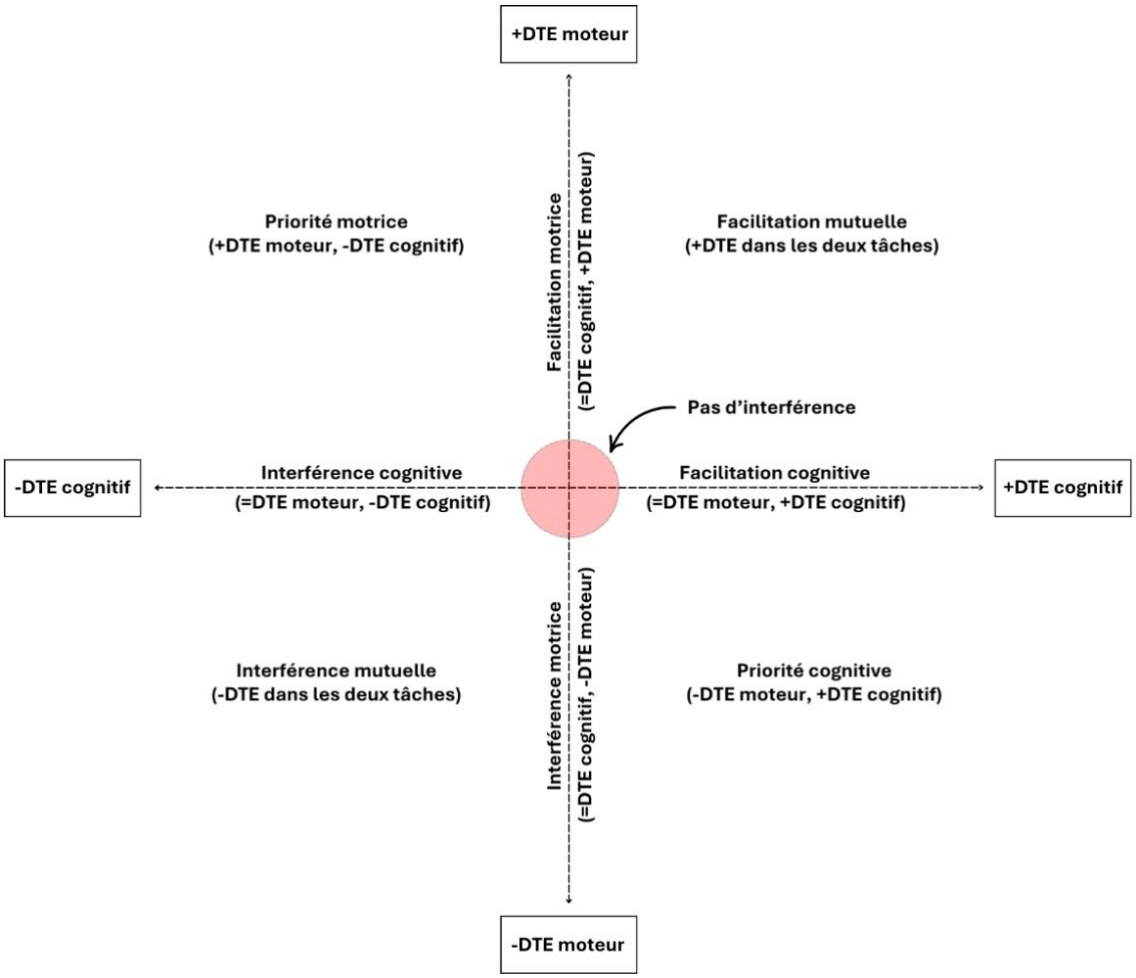


Figure 3. Illustration du modèle conceptuel pour caractériser les schémas de DTE cognitivo-motrice, adaptée et traduite d'après Plummer et al. (2013)
Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche).*

1.2.2. Influence des paramètres de la tâche

La DT peut prendre de nombreuses formes, et l'interférence qui en résulte varie en fonction des caractéristiques des tâches impliquées. En particulier, les propriétés des tâches motrices et cognitives peuvent moduler cette interférence (Al-Yahya et al., 2011).

Tout d'abord, la similarité entre les tâches, que ce soit concernant la nature ou les modalités d'entrée et de sortie, est un facteur important à prendre en compte. Effectivement, la théorie dépendante

du contenu (*content-dependent theory*) (Hazeltine et al., 2006 ; Maquestiaux et al., 2018) propose que l'interférence en situation de DT ne dépende pas uniquement de limitations structurelles ou de capacité, mais également de la nature du contenu à traiter (Hazeltine et al., 2006 ; Maquestiaux et al., 2018). Selon cette approche, l'interférence entre deux tâches sera moindre si les tâches impliquent des types de traitement suffisamment distincts (e.g., verbal vs moteur, auditif vs visuel). En revanche, lorsque les tâches partagent des codes de représentation similaires (e.g., mêmes modalités sensorielles, mêmes types de réponse), l'interférence augmente, car les représentations entrent en compétition dans les mêmes réseaux cognitifs ou neuronaux. Ainsi, le coût de la DT pourrait être plus faible dans les DT intégrant une tâche motrice plutôt qu'une seconde tâche cognitive. Effectivement, les tâches motrices mobiliseraient moins de ressources attentionnelles que les tâches cognitives (Verhaeghen et al., 2003), ce qui pourrait expliquer la raison pour laquelle les effets liés à l'âge y sont généralement moins marqués (Cerella & Hale, 1994). De plus, il a été montré que les coûts de DT sont en général plus élevés lorsque les deux tâches relèvent de la même modalité sensorielle, qu'il s'agisse d'entrées ou de sorties (e.g., deux tâches visuelles) que lorsqu'elles relèvent de modalités différentes (e.g., une tâche visuelle combinée à une tâche auditive) (Pashler, 1994).

Le mode de génération de la tâche cognitive constitue également un facteur déterminant. Se distinguent les tâches autogénérées, produites par le sujet indépendamment du contexte, et les tâches guidées par l'environnement, qui sont dépendantes de l'environnement et sont hors du contrôle direct de la personne[1] (Abernethy, 1988 ; Beauchet & Berrut, 2006 ; Ebersbach et al., 1995 ; Pashler, 1994 ; Treisman, 1969). Les premières, telles que les tâches de fluence verbale (e.g., Schoene et al., 2013), de comptage (e.g., Adcock, Fankhauser, et al., 2020 ; Theill et al., 2013) ou de génération aléatoire de nombres (e.g., Falbo et al., 2016), engagent des réseaux neuronaux complexes qui mobilisent diverses régions cérébrales, interconnectées avec celles impliquées notamment dans le contrôle de la marche (Al-Yahya et al., 2011). En revanche, les tâches guidées par l'environnement activeraient des réseaux attentionnels de bas niveau, qui se recoupent moins avec les réseaux moteurs, ce qui engendre généralement moins d'interférences cognitivo-motrices. Les résultats d'Al-Yahya et al. (2011) appuient également cette idée, en suggérant que les tâches impliquant des interférences internes (autogénérées) perturbent davantage la tâche motrice (la marche dans cette étude) que les tâches impliquant des

[1] Al-Yahya et al. (2011) utilisent, en anglais, les termes « *cognitive tasks that involve internal interfering factors* » et « *external interfering factors* ». Beauchet et Berrut (2006) dans leur article en français utilisent les termes « autogénéré » pour traduire « *conceptually-driven* » et « hétérogénéré » pour traduire « *data-driven* ». Nous avons utilisé, en anglais, « *self-generated* » et « *environment-driven* » (Béraud-Peigné, Perrot, Maquestiaux, et al., 2025), donc en français « autogénéré » et « guidé par l'environnement », pour privilégier des termes immédiatement intelligibles.

interférences externes (guidées par l'environnement). La modalité cognitive, qu'elle soit verbale ou visuospatiale, influence également les coûts de la DT. Par exemple, les différences de latence liées à l'âge sont généralement plus faibles pour les tâches verbales (e.g., empan de mémoire de travail) que pour les tâches visuospatiales (e.g., recherche visuelle) (e.g., Hale & Myerson, 1996), ce qui peut moduler l'impact de l'âge sur les performances en DT.

Enfin, la complexité et la nouveauté des tâches influencent fortement le niveau d'interférence. Plus une tâche est complexe, que ce soit par la vitesse d'exécution requise, le nombre de segments corporels mobilisés ou la nouveauté du contexte, plus elle sollicite des ressources cognitives, ce qui augmente la probabilité d'interférences (Schaefer, 2014). Toutefois, les tâches motrices utilisées dans la littérature sont souvent limitées à des exercices de marche (Al-Yahya et al., 2011 ; Grosboillot et al., 2024), réalisés soit à vitesse préférée, soit via des tests standardisés comme le « *Timed Up and Go* » (TUG) (e.g., Adcock, Fankhauser, et al., 2020 ; Falbo et al., 2016 ; Schoene et al., 2013 ; Theill et al., 2013).

Ainsi, les données restent limitées concernant l'effet du mode de génération de la tâche cognitive sur les formes d'interférences, en particulier lorsque la tâche motrice est plus complexe qu'une tâche de marche simple. En somme, les caractéristiques des tâches, qu'elles soient motrices ou cognitives, influencent fortement l'ampleur et la nature de l'interférence. Une prise en compte des paramètres de la DT est indispensable pour interpréter les performances observées en situation de DT.

1.3. Effets du vieillissement sur les performances en double-tâche

Les personnes âgées, tout comme les jeunes, subissent les effets de l'interférence en DT. En revanche, les âgés semblent rencontrer des coûts plus importants (Verhaeghen et al., 2003). Cette diminution de performance peut être causée par plusieurs facteurs (Verhaeghen et al., 2003). Effectivement, en vieillissant, les ressources d'un individu sont plus limitées [diminution de la vitesse de traitement, capacité réduite à maintenir et préparer des alternatives de réponse en mémoire de travail, déclin de la capacité à exécuter des réponses simultanées (Fraser & Bherer, 2013)] en raison d'une réduction des ressources cognitives et des altérations motrices (voir chapitre 1). Ainsi, en vieillissant, l'individu dispose de moins de ressources pour l'exécution d'une tâche, ce qui laisse moins de capacité disponible pour la réalisation de la tâche simultanée. Cela entraînerait une performance relativement plus faible chez les adultes âgés que chez les plus jeunes (Hartley & Little, 1999).

Plusieurs études indiquent que les adultes plus âgés sont plus lents dans des conditions de DT que les adultes plus jeunes (Hartley & Little, 1999 ; McDowd & Shaw, 2000). La méta-analyse de

Verhaeghen et al. (2003) confirme ces résultats en précisant que tous les paramètres de la DT ne semblent pas touchés. La latence en DT est affectée par l'âge, avec des différences généralement plus faibles pour les tâches verbales que pour les tâches visuospatiales (e.g., Hale & Myerson, 1996), tandis que la précision ne semble pas significativement altérée. De plus, bien que les différences liées à l'âge soient généralement plus faibles pour les tâches motrices que pour les tâches cognitives (Cerella & Hale, 1994), la méta-analyse d'Al-Yahya et al. (2011) suggère que la marche en DT chez les adultes âgés en bonne santé est davantage affectée comparée à celle des jeunes adultes, notamment lors de tâches de suivi mental telles que le comptage à rebours. Cependant, tout comme les capacités physiques et cognitives, les performances en DT peuvent être améliorées chez les personnes âgées, notamment grâce à des programmes d'entraînement (Gallou-Guyot et al., 2020).

2. LIMITES DES ÉVALUATIONS ACTUELLES ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

2.1. Les évaluations conventionnelles et leurs limites

L'évaluation des capacités cognitives et de DT est essentielle, en raison de leur rôle central dans la vie quotidienne. Elle permet à la fois de dépister d'éventuels troubles cognitifs et de révéler certaines fragilités, mais également de suivre l'évolution (positive ou négative) de ces fonctions dans le temps. Il est donc crucial que les outils d'évaluation soient à la fois adaptés et efficaces. Dans cette deuxième partie, un intérêt particulier est porté à l'évaluation des capacités cognitives et de DT dans le cadre d'une méthodologie interventionnelle, en lien avec les études menées dans cette thèse. S'agissant de la DT, cette section se focalise spécifiquement sur la DT cognitivo-motrice, en raison de son développement récent et de l'intérêt croissant qu'elle suscite dans le contexte des interventions basées sur l'activité physique et l'entraînement cognitif.

2.1.1. L'évaluation cognitive

L'évaluation cognitive des personnes âgées peut se faire par divers moyens. Le niveau cognitif global est évalué à l'aide d'échelles et de questionnaires spécifiques tels que le *Mini-Mental State Examination* (MMSE) (Folstein et al., 1975) ou le *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA) (Nasreddine et al., 2005). Ces outils permettent principalement de dépister les troubles cognitifs, notamment ceux associés à la maladie d'Alzheimer ou à d'autres formes de démence. Ils sont également utilisés dans le cadre de méthodologies longitudinales pour suivre l'évolution cognitive au fil du temps.

Pour une évaluation plus fine, notamment à court terme (i.e., quelques semaines à quelques mois), l'imagerie cérébrale et les tests neuropsychologiques sont les plus adaptés. En effet, certaines

méthodes d'imagerie permettent d'explorer l'activité et la structure cérébrale, comme l'IRM fonctionnelle (IRMf), qui analyse l'activité cérébrale lors de tâches cognitives, l'IRM structurelle, qui évalue les modifications anatomiques du cerveau, l'ÉlectroEncéphaloGraphie (EEG), qui enregistre l'activité électrique cérébrale ou encore la spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS, *Near-InfraRed Spectroscopy*), qui mesure l'oxygénation cérébrale en temps réel. Néanmoins, ces méthodes d'imagerie sont encore peu utilisées sur le terrain en raison de leurs coûts élevés et de leur accessibilité limitée. Certains hôpitaux ou laboratoires ne disposent pas des équipements nécessaires, et la logistique des examens peut être contraignante pour les personnes âgées. De plus, les modifications observées par imagerie cérébrale (e.g., augmentation du volume de l'hippocampe, activation de certaines régions) ne reflètent pas nécessairement une amélioration des performances cognitives mesurées par des tests neuropsychologiques. Ces derniers fournissent une évaluation fonctionnelle directe des capacités cognitives (e.g., mémoire, attention, fonctions exécutives), alors que l'imagerie ne mesure que des marqueurs de ces fonctions. Ainsi, bien que les mesures de neuroimagerie et d'électrophysiologie soient précieuses pour explorer les mécanismes neuronaux sous-jacents, les tests neuropsychologiques demeurent la méthode de référence pour évaluer les capacités cognitives.

Les fonctions cognitives spécifiques sont examinées à l'aide de tests neuropsychologiques standardisés, comme le test de Stroop (Stroop, 1935) pour évaluer l'inhibition, le *Trail Making Test* (TMT) (Reitan, 1979) pour mesurer la flexibilité cognitive ou encore le Test de Corsi (Wechsler, 1997) pour évaluer la mémoire visuospatiale. Étant validés, fiables, sensibles et efficaces, ces tests sont largement utilisés dans la recherche et sur le terrain pour mettre en évidence les effets des programmes auprès de personnes âgées. Cependant, ils présentent certaines limites. Par exemple, la manière dont l'intervenant explique, administre et motive le participant peut varier d'un sujet à l'autre. Les mesures de temps sont souvent relevées à l'aide d'un simple chronomètre, déclenchées et enregistrées manuellement par l'expérimentateur, ce qui peut entraîner des imprécisions. Les questions ne sont pas générées aléatoirement à chaque passation, ce qui réduit les opportunités de test-retest. En conclusion, les tests cognitifs traditionnels peuvent manquer de sensibilité et de précision, notamment pour la détection de faibles évolutions à court terme. Enfin, ces tests présentent une valeur écologique limitée, car ils ne reflètent pas toujours les performances en contexte réel. La valeur écologique d'un test désigne le degré auquel les résultats obtenus permettent de prédire ou de refléter les performances d'un individu dans des contextes fonctionnels de la vie quotidienne. Cette notion implique que les conditions expérimentales dans lesquelles le test est administré soient représentatives des exigences cognitives et/ou physiques/motrices rencontrées dans l'environnement (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). Dans la vie quotidienne, la mobilisation des fonctions cognitives est étroitement liée à celle des capacités

motrices/physiques, or les tests neuropsychologiques traditionnels les évaluent souvent de manière isolée. L'intégration d'une composante motrice dans les tests cognitifs apparaît d'autant plus pertinente que se développent des interventions combinant des entraînements cognitif et physique (voir chapitre 4). Ce constat renforce la nécessité de concevoir de nouveaux outils d'évaluation, à la fois sensibles et écologiquement valides, à même de refléter la complexité des situations rencontrées par les personnes âgées au quotidien.

2.1.2. L'évaluation des capacités en double-tâche

L'évaluation des capacités de DT cognitivo-motrice commence à être intégrée dans un nombre croissant de recherches chez les personnes âgées dans le cadre d'études interventionnelles (e.g., Adcock, Fankhauser, et al., 2020 ; Béraud-Peigné et al., 2024 ; Falbo et al., 2016 ; Schoene et al., 2013 ; Theill et al., 2013). En complément de l'évaluation des capacités physiques, motrices et/ou cognitives, l'évaluation de la DT dans ce type d'études offre une approche multidimensionnelle pertinente.

La tâche motrice est le plus souvent la marche, dont la complexité des situations varie (Grosboillot et al., 2024 ; K. Z. H. Li et al., 2018 ; Plummer et al., 2015), effectuée à une vitesse préférentielle (e.g., Adcock et al., 2020 ; Falbo et al., 2016 ; Theill et al., 2013) ou maximale. Elle est généralement couplée à une tâche cognitive de fluence verbale, d'empan, de compte à rebours (Montero-Odasso et al., 2012) ou à une tâche de Stroop verbal. Le TUG, évaluant l'équilibre dynamique, est également fréquemment utilisé (e.g., Schoene et al., 2013), souvent associé à une tâche de fluence verbale ou de décompte (Nordin et al., 2010). L'usage d'outils numériques se développe également (e.g., N-back, Go/No-Go tout en marchant ou en pédalant). Toutefois, ces dispositifs demeurent peu accessibles et nécessitent souvent des compétences techniques ou des environnements spécifiques. Comme dans le domaine de l'évaluation cognitive, les mesures des capacités de DT peuvent manquer de valeur écologique, puisque les tests actuels reproduisent rarement la complexité des situations rencontrées dans la vie quotidienne. Des approches immersives, comme la réalité virtuelle simulant des scénarios quotidiens [e.g., traverser une rue en écoutant de la musique ou en ayant une conversation téléphonique (Neider et al., 2011)], sont prometteuses mais encore peu diffusées et coûteuses à mettre en œuvre. Par ailleurs, les tâches motrices plus complexes que la marche ou les situations d'équilibre sont peu explorées. Pourtant, comme indiqué précédemment, la complexité des tâches motrices, l'environnement et la nouveauté sont des caractéristiques cruciales, car plus les tâches sont difficiles, plus elles mobilisent de ressources (Schaefer, 2014). Enfin, pour caractériser précisément la DTE et suivre l'évolution au fil du temps, il est essentiel d'évaluer la performance en ST et en DT pour chacune des deux composantes, ainsi que les performances relatives des tâches entre elles. Or, ces effets croisés sont

souvent négligés : de nombreuses études ne mesurent pas la performance cognitive en condition de ST et/ou de DT (Plummer et al., 2013, 2015). En somme, l'évaluation des capacités de DT reste un champ en développement qui gagnerait à s'enrichir de méthodologies plus sensibles, écologiques et diversifiées pour mieux refléter les défis du vieillissement.

2.2. Développement de nouvelles méthodes

2.2.1. Nouvelles approches d'évaluation cognitive

L'évaluation des capacités cognitives bénéficie aujourd'hui du développement des nouvelles technologies (Sternin et al., 2019), qui offrent une alternative efficace aux tests cognitifs équivalents sur papier. En effet, les tests informatisés permettent de mesurer les latences de réponse à la milliseconde, ce qui accroît la précision des évaluations. L'automatisation de l'administration et de la notation facilite la collecte, l'enregistrement et l'analyse simultanée de multiples aspects de la performance. De plus, les résultats peuvent être stockés et comparés entre différentes sessions, rendant l'interprétation plus fiable, précise et objective (Zygouris & Tsolaki, 2015). Les biais des administrateurs sont limités grâce à la standardisation des tests (Wild et al., 2008). Enfin, ces tests permettent également de moduler la difficulté en fonction du niveau du participant, limitant ainsi les effets de plancher et de plafond. Toutefois, leur utilisation auprès des personnes âgées soulève certaines limites. Celles-ci peuvent exprimer des attitudes négatives face aux technologies (Broady et al., 2010). L'interface du test peut sembler intimidante et/ou contre-intuitive pour les personnes âgées. Le manque de familiarité avec les nouvelles technologies et la présence potentielle d'une anxiété technologique pourraient influencer les performances et la volonté de participer aux tests. En outre, l'absence de normes psychométriques et de données normatives suffisantes pour ces tests freine leur adoption (Zygouris & Tsolaki, 2015). Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de concevoir des outils combinant les avantages des technologies actuelles (i.e., précision, standardisation) sans entraîner d'événements négatifs.

Les Dispositifs Lumineux Interactifs (DLI) comme *BlazePod*, *Fitlight* ou *Witty SEM* (*Microgate*), représentent une solution potentielle aux tests informatisés. Ils sont composés de modules lumineux programmables (e.g., couleurs, lettres, chiffres, icônes) et sont actuellement utilisés dans l'optimisation de la performance sportive (basket-ball, Gonzalo-Skok et al., 2015 ; tennis de table, Horníková, 2023 ; handball, Horníková et al., 2021), comme outils d'entraînement (Horváth et al., 2022) et d'évaluation. Plus récemment, une étude effectuée auprès de personnes âgées (Ilin & Kalron, 2025) a utilisé un dispositif DLI pour créer un test et évaluer sa validité convergente avec des mesures d'équilibre ainsi que sa reproductibilité test-retest. Réalisé auprès de personnes âgées de 72 ans en moyenne, le test était

effectué avec le dispositif *BlazePod*. Pendant 30 secondes, les participants devaient éteindre le plus rapidement possible une lumière qui apparaissait sur un pod, en le touchant avec leurs pieds. Une fois le pod désactivé, un autre s'illuminait immédiatement. Les pods étaient illuminés dans un ordre aléatoire. Par ailleurs, aucune étude à notre connaissance ne s'est intéressée à leur application dans le cadre du vieillissement cognitif. Pourtant, les DLI pourraient permettre de concevoir des tests plus écologiques et précis, combinant les composantes cognitives et motrices. Par exemple, le participant doit réaliser une action motrice (toucher la bonne cible) en réponse à une tâche cognitive (identifier la bonne couleur, lettre ou chiffre). Ces tests seraient particulièrement adaptés pour évaluer les effets des programmes combinés. L'interface est simple et facilement accessible et compréhensible, permettant de limiter les attitudes potentiellement négatives face aux technologies. De plus, leur caractère interactif, ludique et technologique les rend également intéressants dans le cadre de l'évaluation d'interventions basées sur les Jeux Vidéo (JV) (voir partie 3.2 du chapitre 3) ou les exergames (voir partie 4.2 du chapitre 4). En combinant les tâches motrices et cognitives, cela rend l'évaluation cognitive moins isolée et donc plus écologique et pertinente. Enfin, grâce à une gestion centralisée (via chronomètre, transmission radio ou Bluetooth), les données sont enregistrées en temps réel, avec une précision à la milliseconde, surpassant celle des mesures chronométrées manuellement. Les DLI offrent ainsi une méthode d'évaluation innovante, potentiellement capable de détecter des changements subtils et d'accompagner le suivi des fonctions cognitives liées au vieillissement.

2.2.2. Nouvelles approches pour l'évaluation en double-tâche

Jusqu'à présent, le développement des tests de capacités en DT est resté plus limité que celui des tests cognitifs. Une partie de la littérature s'est intéressée à leur utilisation dans la détection précoce de troubles cognitifs, notamment à travers l'adaptation de tests cognitifs classiques combinés à une tâche de marche (e.g., test de Stroop : Perrochon et al., 2013, test de Corsi : Perrochon et al., 2014 ; Trail Making Test : Perrochon & Kemoun, 2014)[1]. Par ailleurs, la réalité virtuelle, et en particulier l'utilisation de casques immersifs, est de plus en plus mobilisée (Grosboillot et al., 2024). Néanmoins, ces aspects ne seront pas approfondis dans ce travail, qui se concentre sur le développement de tests destinés à être intégrés dans une méthodologie interventionnelle et utilisables par les professionnels de terrain

[1] Ces tests incluent des tâches motrice et cognitive incorporées [tâche cognitive intégrée à une tâche de marche complexe, selon Grosboillot et al. (2024)].

(Enseignants en Activité Physique Adaptée, EAPA[1]). Comme évoqué précédemment (Partie 2.1.2), la majorité des paradigmes de DT actuellement utilisés repose sur des tâches motrices relativement simples (telles que la marche à vitesse spontanée ou des exercices d'équilibre) couplées à une variété de tâches cognitives. Bien que ces combinaisons aient permis de mettre en évidence des effets d'interférence entre les dimensions motrice et cognitive, elles présentent certaines limites, en particulier pour détecter des évolutions subtiles au fil du temps et pour refléter fidèlement les exigences des activités de la vie quotidienne. Dans cette perspective, il semble nécessaire de concevoir des tâches cognitives et motrices générant une interférence suffisante pour détecter des évolutions, tout en restant accessibles et pertinentes pour une population âgée. En effet, ces tâches ne doivent pas être trop complexes pour éviter une surcharge cognitive, susceptible d'entraîner des effets négatifs. Elles doivent toutefois solliciter suffisamment les fonctions de manière assez soutenue pour permettre le suivi des variations des performances dans le temps.

Une des principales perspectives concerne l'enrichissement de la composante motrice des tests. Les tâches motrices actuellement utilisées sont certes simples à standardiser et à mettre en place, mais elles ne reflètent qu'imparfaitement la complexité des situations motrices rencontrées dans la vie quotidienne. Intégrer des tâches motrices plus élaborées, impliquant par exemple, la coordination de plusieurs membres ou des contextes instables, permettrait d'évaluer les capacités de DT dans des environnements plus réalistes et exigeants. Au-delà de la dimension motrice, une autre piste d'approfondissement concerne le mode de génération de la tâche cognitive. En effet, la distinction entre les tâches autogénérées et induites par l'environnement (Al-Yahya et al., 2011) mérite d'être approfondie, puisque ces deux modes de génération pourraient entraîner des interférences variables (voir partie 1.2.2 de ce chapitre). Pourtant, peu d'études ont abordé l'effet de cette distinction sur la nature et l'ampleur des interférences cognitivo-motrices, en particulier dans des contextes de DT impliquant une mobilisation motrice complexe. Ainsi, le développement de nouveaux paradigmes de DT, intégrant à la fois des tâches motrices plus complexes et une réflexion fine sur le mode de génération des tâches cognitives employées, constitue une voie prometteuse pour améliorer la sensibilité, la validité écologique et la pertinence de ces outils d'évaluation.

[1] Définition selon le Consortium National Activité Physique Adaptée et Santé : « le titulaire d'une licence STAPS mention Activité Physique Adaptée Santé (enseignant en APA ou EAPA) intervient auprès de toute personne n'ayant pas ou ne pouvant pas pratiquer une activité physique ou sportive dans des conditions ordinaires et qui présente des besoins spécifiques de santé, de participation sociale ou d'inclusion du fait d'une maladie, d'une limitation fonctionnelle, d'une déficience, d'une vulnérabilité, d'une situation de handicap, d'exclusion, d'une inactivité ou d'une sédentarité ».

Synthèse du chapitre 2

Ce chapitre met en évidence les limites des outils classiques d'évaluation des capacités cognitives et de DT qui, bien qu'utilisés en recherche, présentent un manque de sensibilité et de validité écologique. Il souligne la nécessité de développer des méthodes plus représentatives des défis liés au vieillissement, afin de mieux détecter les évolutions subtiles dans le cadre d'approches interventionnelles et de favoriser une meilleure compréhension des interactions cognitivo-motrices.

CHAPITRE 3 - ENTRAÎNEMENTS PHYSIQUE ET COGNITIF : APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES, ENJEUX D'ÉVALUATION, EFFETS SUR LE VIEILLISSEMENT

Le vieillissement s'accompagnant d'un déclin progressif des fonctions physiques, motrices, cognitives et de DT, l'une des priorités est d'identifier des interventions capables de préserver ou stimuler ces capacités au fil du temps. Ce chapitre explore ainsi les effets chroniques (de plusieurs semaines à plusieurs années) des interventions physiques (y compris motrices) et cognitives. La première partie revient brièvement sur les principales approches méthodologiques employées pour évaluer ces effets et souligne l'intérêt des études interventionnelles pour établir des liens de causalité. Les deux parties suivantes se consacrent aux effets spécifiques de l'activité physique (Parties 2 et 3) et de l'entraînement cognitif (Partie 4), et plus particulièrement des Jeux Vidéo (JV).

Selon la définition modifiée de Torre et Temprado (2022) et celle de Netz (2019), une distinction conceptuelle est faite entre trois types d'entraînement : cognitif, physique et moteur. L'entraînement cognitif consiste en la répétition d'exercices de difficulté croissante visant à solliciter une fonction cognitive spécifique ou un ensemble de processus cognitifs (Bamidis et al., 2014). Il peut être réalisé à l'aide de divers outils technologiques (e.g., logiciels, jeux vidéo) ou dans des contextes naturels. L'entraînement physique désigne les mouvements corporels engendrés par la contraction des muscles squelettiques. Il est généralement basé sur l'aérobie et le renforcement musculaire. L'entraînement aérobie cible principalement le système cardiovasculaire via des activités cycliques mobilisant de grands groupes musculaires, telles que la marche, la course et le cyclisme. Le renforcement musculaire repose généralement sur des exercices effectués en utilisant le poids du corps, des poids libres ou des machines. Ces activités sont répétitives et automatiques par nature, se caractérisant par une forte dépense énergétique et un effort neuromusculaire relativement faible (le renforcement musculaire exige néanmoins plus d'efforts neuromusculaires que l'entraînement aérobie). L'entraînement moteur consiste en la pratique de mouvements à complexité variable, impliquant généralement plusieurs articulations et segments corporels (e.g., bras, jambes, tronc), chacun ayant une liberté de mouvement dans plusieurs directions (e.g., flexion, extension, rotation). Les activités motrices comprennent l'équilibre et la coordination, impliquant de fortes exigences neuromusculaires, mais une demande métabolique relativement faible comparativement à l'entraînement physique. L'entraînement moteur nécessite des processus attentionnels et perceptifs pour être élaborés et contrôlés avec précision. La flexibilité est

considérée comme une activité motrice, bien qu'elle n'exige pas un effort neuromusculaire important. En plus des activités motrices de base, il existe des habiletés motrices plus complexes et intenses. Par exemple, le yoga, le Taï-chi, les danses douces et certains exergames proviennent des activités motrices de base et nécessitent généralement plus d'efforts neuromusculaires que des activités simples d'équilibre et de coordination. Une dernière catégorie plus exigeante, combinant des activités physiques et motrices telles que le tennis, le basket-ball et certains exergames (Netz, 2019) peut être qualifiée d'entraînement multi-domaine puisqu'elle combine à la fois des entraînements physique, moteur et cognitif. Si ces catégories (physique, motrice, cognitive) permettent une meilleure structuration analytique, elles ne doivent donc pas être considérées comme indépendantes. Tout entraînement physique engage également des processus moteurs et cognitifs, à des degrés variables. Par exemple, bien que la course à pied puisse être classée comme un « entraînement physique » en raison de son impact important sur le système cardiovasculaire, elle sollicite également, dans une moindre mesure, le système moteur et les fonctions cognitives, notamment lors de la phase d'apprentissage moteur. Il est donc plus pertinent de considérer ces différentes stimulations comme un continuum plutôt que comme des catégories strictement dichotomiques.

1. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES

La relation entre certaines activités, telles que l'activité physique ou l'entraînement cognitif, et les domaines cognitif et corporels a été largement explorée à l'aide de différentes approches méthodologiques. Trois approches principales se distinguent : transversale, longitudinale et interventionnelle.

1.1. Approche transversale

L'approche transversale consiste à comparer, à un instant donné, les performances de différents groupes d'individus en fonction de leurs caractéristiques spécifiques (e.g., âge, niveau d'activité physique, cognitive ou sociale). Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir rapidement des données sur de larges échantillons. Cependant, elle présente plusieurs limites importantes. En premier lieu, cette approche ne permet pas de conclure sur les évolutions physiques ou cognitives liées à l'âge, car elle ne mesure pas les changements intra-individuels mais uniquement des différences intergroupes. Cela expose les résultats à un effet de cohorte : les individus comparés n'appartiennent pas à la même génération et ont connu des contextes de vie différents, ce qui peut biaiser les interprétations. En effet, il est impossible de garantir que les jeunes adultes d'aujourd'hui vieilliront comme les personnes âgées actuellement étudiées.

Par ailleurs, lorsque l'objectif est d'évaluer l'influence d'une activité ou d'un entraînement sur le vieillissement, il est difficile d'en isoler précisément les effets (e.g., cognitifs, physiques). D'autres facteurs (e.g., prédispositions génétiques, environnement socio-économique, habitudes de vie) peuvent interférer. De plus, les mesures autodéclarées, fréquemment utilisées dans l'approche transversale, sont sujettes à des biais de désirabilité sociale, réduisant la fiabilité des données recueillies. Enfin, l'approche transversale ne permet pas d'établir un lien de causalité, rendant impossible la distinction entre effet de l'activité et sélection préalable des individus plus actifs par nature.

1.2. Approche longitudinale

L'approche longitudinale suit les mêmes individus sur la durée, afin d'observer l'évolution de leurs performances. Elle offre la possibilité d'étudier l'impact d'une exposition prolongée à certains facteurs liés au mode de vie (e.g., activité physique, stimulation cognitive). Bien que plus informative sur les trajectoires individuelles, cette méthode ne permet pas, à l'instar de l'approche transversale, d'affirmer un lien de causalité. De plus, elle présente plusieurs limites pratiques et méthodologiques. D'une part, elle est coûteuse en temps et en ressources, ce qui limite son utilisation. D'autre part, elle est sujette à deux biais notables : la mortalité expérimentale, c'est-à-dire la perte progressive de participants au fil du temps (e.g., déménagements, décès, abandons) et l'effet de familiarisation à la tâche, où les participants s'habituent aux tests répétés, pouvant fausser les résultats en induisant une amélioration artificielle (ou une moindre diminution) des performances.

1.3. Approche interventionnelle

1.3.1. Intérêts et limites

L'approche interventionnelle permet de dépasser certaines limites des méthodes transversale et longitudinale, en évaluant l'impact direct d'un programme ou d'une activité spécifique sur les performances des participants. Grâce à l'assignation des participants à un groupe expérimental ou contrôle (de manière aléatoire ou non), cette méthode permet un meilleur contrôle des variables confondantes et offre la possibilité d'inférer un lien de causalité. La comparaison entre les mesures pré- et post-intervention permet d'évaluer plusieurs dimensions des effets observés : leur magnitude (i.e., ampleur de l'amélioration), leur envergure (i.e., transfert proche, transfert éloigné) et leur rétention (i.e., effet durable, effet transitoire). Cependant, de nombreuses études n'intègrent pas d'évaluation du maintien des effets à long terme, ce qui limite leur portée (e.g., Liu-Ambrose et al., 2010 ; Maillot et al., 2012 ; Schoene et al., 2013 ; Wollesen et al., 2017). De plus, la randomisation est un point clé, sans quoi la validité interne peut être compromise, notamment si le groupe contrôle modifie spontanément son

comportement par effet de contamination (Reichardt, 2002). Enfin, toute conclusion scientifique solide exige une réplication expérimentale sur des échantillons variés pour confirmer la robustesse des résultats.

Malgré les réserves présentées, l'approche interventionnelle demeure à ce jour la plus appropriée pour établir des liens de causalité entre l'activité physique et/ou la stimulation cognitive et les mécanismes d'enrichissement cognitif (terme défini dans la partie 2.3 du chapitre 1). Elle constitue une voie privilégiée pour comprendre et comparer les effets de différentes activités (e.g., physique, motrice, cognitive, combinée), ainsi que pour étudier la manière dont ces dernières influencent le fonctionnement physique et cognitif.

1.3.2. Effets de transfert et de rétention

Une des forces des études interventionnelles réside dans leur capacité à évaluer les effets de transfert et de rétention des programmes, deux mesures fondamentales lorsqu'il s'agit de concevoir des interventions efficaces pour les personnes âgées. Deux catégories d'effets de transfert sont à distinguer : le transfert proche et le transfert éloigné. Le transfert proche correspond à un effet spécifique, caractérisé par une faible différence entre la tâche d'entraînement et la tâche de transfert (i.e., tâche sur laquelle le participant est évalué). À l'inverse, le transfert éloigné (ou non spécifique) se manifeste par un écart plus important entre la tâche d'entraînement et la tâche de transfert. Cette dichotomie s'est révélée insuffisante pour rendre compte de la complexité des phénomènes observés. C'est dans cette perspective que les travaux de Barnett et Ceci (2002) apportent une contribution essentielle. Les auteurs proposent une taxonomie qui permet de caractériser avec plus de précision les différentes formes de transfert, à travers un continuum, selon deux grandes dimensions : le contenu transféré et le contexte dans lequel il est transféré.

La première dimension concerne le contenu qui est transféré d'un contexte d'apprentissage (e.g., un programme d'entraînement simultané, physique, cognitif) vers un autre (e.g., tests physiques et cognitifs). Selon Barnett et Ceci (2002), le contenu du transfert peut être analysé à travers trois sous-dimensions principales : i) la spécificité-généralité de la compétence acquise, ii) la nature du changement de la performance évaluée et iii) les exigences mnésiques de la tâche. La spécificité-généralité de la compétence acquise distingue les compétences spécifiques (e.g., une stratégie mentale précise, ou une procédure motrice répétée) des compétences générales. Les compétences générales, plus abstraites et flexibles, sont plus susceptibles de se transférer à des contextes nouveaux. Dans le cadre du vieillissement cognitif, cette distinction spécificité-généralité est cruciale : un entraînement ciblé sur les

fonctions exécutives peut produire un effet spécifique sur une tâche de flexibilité cognitive, sans nécessairement se transférer à une situation réelle, telle qu'une prise de décision rapide dans un environnement complexe. La nature du changement de performance évaluée concerne la manière dont le transfert est mesuré : cela peut être la vitesse d'exécution, la précision ou la qualité de la performance, ou encore le type de comportement adopté. Enfin, les exigences mnésiques de la tâche de transfert font référence au niveau de sollicitation cognitive nécessaire pour appliquer la compétence acquise, allant de l'exécution guidée (le participant reçoit une consigne explicite), en passant par la reconnaissance (le participant identifie une situation où appliquer la compétence) jusqu'au rappel spontané (la compétence est mobilisée de manière autonome, sans aide extérieure).

La seconde grande dimension concerne le contexte du transfert. Celui-ci peut varier selon plusieurs axes : le domaine de connaissance (e.g., une tâche d'entraînement en mémoire transférée à une tâche de raisonnement), le contexte physique au niveau macro (e.g., en laboratoire, à domicile) et micro (e.g., salle, expérimentateur), le contexte temporel (e.g., immédiat, plusieurs semaines/mois), le contexte fonctionnel (e.g., tâche académique, tâche de la vie quotidienne), le contexte social (e.g., activité réalisée en groupe, seul), et la modalité (e.g., format écrit, oral). Par exemple, une amélioration des performances observée juste après un entraînement cognitif individuel, en laboratoire, sur une tâche très similaire à celle utilisée durant l'entraînement, relève d'un transfert proche, tant au niveau du contenu que du contexte. À l'inverse, si des gains issus d'un entraînement identique à l'exemple précédent sont observés dans des situations de la vie quotidienne plusieurs semaines après l'intervention, alors il s'agit d'un transfert éloigné.

La dimension temporelle identifiée par Barnett et Ceci (2002) permet d'établir un pont conceptuel avec les effets de rétention, c'est-à-dire le maintien des bénéfices au fil du temps (de quelques minutes à plusieurs années). Une rétention à long terme peut ainsi être considérée comme une forme de transfert éloigné dans le temps. Étant donné la lourdeur méthodologique qu'impliquent les tests de rétention, peu d'études interventionnelles incluent ces tests dans leur protocole. Pourtant, ils représentent une mesure de qualité pour déterminer si les programmes étudiés génèrent des effets à long terme.

Dans le champ de la prévention du vieillissement cognitif (mais également physique et moteur), cette approche de transfert est particulièrement pertinente. Elle permet de mieux juger la valeur écologique des interventions, en mettant en évidence que des effets parfois jugés « faibles » en laboratoire (par exemple, s'ils sont déterminés en fonction de la taille d'effet) peuvent avoir un impact important si l'on considère leur degré de transfert.

2. EFFETS DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES ET EN DOUBLE-TÂCHE

L'activité physique procure une myriade d'effets, notamment sur les capacités physiques, motrices, cognitives et de DT des personnes âgées. Cette partie se concentre uniquement sur les effets chroniques (par opposition aux effets aigus), c'est-à-dire ceux observés après un entraînement de plusieurs séances et réalisé sur une durée minimale de plusieurs semaines.

2.1. Évaluation, effets et mécanismes de l'activité physique sur les capacités physiques et motrices

2.1.1. Méthodes d'évaluation des effets physiques et moteurs

Les capacités physiques et motrices des personnes âgées constituent des indicateurs centraux du vieillissement, car elles sont fortement liées à l'autonomie, à la qualité de vie et au risque de chute (Fleg, 2012). Elles sont classiquement mesurées de manière objective, à l'aide de tests standardisés visant à évaluer, à la fois, la performance fonctionnelle, la mobilité, la force musculaire et la capacité aérobie. D'autres méthodes, telles que l'utilisation de capteurs d'activité physique (e.g., accéléromètres, montres connectées, podomètres), permettent de mesurer le niveau d'activité physique quotidienne et les comportements sédentaires (Troiano et al., 2008). Toutefois, ces approches ne sont pas développées dans le cadre de cette thèse, celle-ci s'intéressant majoritairement aux capacités physiques et motrices et non au niveau d'activité physique.

Les tests de terrain sont les plus fréquemment utilisés en contexte clinique, gériatrique ou communautaire. Ils évaluent des fonctions physiques et motrices de base à travers des tâches simples, peu coûteuses, reproductibles, et applicables à un large éventail de personnes âgées. La batterie du *Senior Fitness Test* (Rikli & Jones, 1999) fait partie des tests les plus communs, comprenant notamment le TUG, qui évalue l'équilibre dynamique, le Test de Marche de 6 minutes (TM6), qui mesure l'endurance fonctionnelle, et le 30 secondes assis-debout, qui estime la force des membres inférieurs. Ces tests permettent d'identifier les limitations fonctionnelles et, par exemple, de prédire le risque de chute (Barry et al., 2014). Toutefois, ils ne fournissent qu'une estimation indirecte de la capacité physiologique sous-jacente, notamment des fonctions cardiorespiratoires. Une corrélation modérée (r = 0,59) a cependant été trouvée entre le TM6 et la VO_2max dans une récente étude réalisée auprès de personnes âgées (moyenne d'âge de 70 ans) (Seldeen et al., 2024). La coordination est également un élément important à prendre en compte dans l'évaluation des capacités motrices des personnes âgées. Pourtant, peu de tests spécifiquement conçus pour mesurer la coordination motrice globale chez les seniors en bonne

santé sont disponibles. On recense notamment le *Lower Extremity MOtor Coordination Test* (LEMOCOT, Desrosiers et al., 2005) dans lequel le participant doit taper avec le pied, le plus rapidement possible, entre deux cibles espacées de 30 cm, pendant 20 secondes. Pour ce test, un effet plafond peut rapidement être observé chez les participants en bonne santé, ce qui limite sa capacité à discriminer les niveaux de performance. De plus, le LEMOCOT n'implique pas de contrainte d'équilibre dynamique, ce qui le déconnecte des exigences fonctionnelles des activités de la vie quotidienne. Il existe également le *Four-Square Stepping Test* (FSST, Dite & Temple, 2002), évaluant la capacité à changer rapidement de direction en marchant dans un parcours délimité en croix (quatre cases formant un carré). Bien qu'il sollicite la coordination dans un contexte d'équilibre dynamique, ce test présente lui aussi un effet plafond notable. Une étude récente a également mis en évidence l'absence de test de coordination adapté aux personnes âgées et a proposé un nouveau test (Rosado et al., 2025). Ce dernier comprend trois tâches consistant à effectuer des mouvements simultanés des bras et des jambes, avec des combinaisons homolatérales et croisées. Chaque tâche est répétée quatre fois et est notée de 1 à 4 par l'examinateur selon la qualité de l'exécution. Ce test est donc sujet à une évaluation subjective, bien que standardisée, et présente une faible sensibilité pouvant limiter sa capacité à détecter des progrès.

Pour une évaluation plus approfondie des capacités physiques, des tests de laboratoire sont utilisés. Le plus représentatif est la mesure de la consommation maximale d'oxygène (VO_2max), obtenue lors d'un test d'effort progressif sur tapis roulant ou vélo, avec analyse des échanges gazeux (Fleg, 2012). Ces tests fournissent une quantification précise de la capacité aérobie maximale, un marqueur prédictif majeur de la mortalité, de la morbidité cardiovasculaire et, plus largement, de l'état de santé générale (Kodama et al., 2009). Ces évaluations sont plus sensibles et spécifiques que les tests de terrain, cependant, elles nécessitent un environnement contrôlé, des équipements spécialisés et une supervision médicale, ce qui limite leur accessibilité en pratique courante, en particulier chez les personnes âgées. Ce type de test n'a donc pas été utilisé dans cette thèse.

2.1.2. Les effets de l'activité physique sur les capacités physiques et motrices

L'activité physique est reconnue comme un élément clé pour améliorer les capacités physiques et motrices des personnes âgées (Nelson et al., 2007). La pratique aérobie améliore principalement la condition cardiovasculaire (Fleg, 2012). Une méta-analyse de 41 études d'entraînement auprès de personnes âgées de 61 à 86 ans a démontré une augmentation moyenne de la VO_2max de 16 % (G. Huang et al., 2005). Elle indique que de meilleurs résultats sont associés aux entraînements de plus de 20 semaines et d'une intensité d'au moins 60 % de la VO_2max (i.e., fin de l'intensité modérée, début de l'intensité élevée). Le renforcement musculaire, quant à lui, favorise plus spécifiquement le

développement de la masse, de la force et de la puissance musculaire chez les personnes âgées (Hunter et al., 2004). Il est particulièrement pertinent pour prévenir la sarcopénie, et pour ses effets bénéfiques sur les limitations fonctionnelles, en réduisant la difficulté à accomplir les tâches de la vie quotidienne (pour revue, voir Hunter et al., 2004). Les effets présentés reflètent le principe de spécificité de l'entraînement, signifiant que la stimulation d'une certaine partie du corps ou d'une composante particulière développe principalement celle-ci, à condition que soient également respectés d'autres principes, notamment celui de la surcharge (application d'un stress supérieur à la normale) et celui de la progressivité (augmentation graduelle de la charge de travail) (Ammann et al., 2014).

Bien que l'entraînement soit spécifique, les exercices relevant d'une modalité (e.g., aérobie, renforcement musculaire) peuvent également influencer d'autres capacités (e.g., équilibre). C'est ce qu'a testé la méta-analyse d'Orr et al. (2008), s'intéressant aux effets potentiels du renforcement musculaire sur l'équilibre. Ce travail en souligne l'intérêt, mais les auteurs insistent également sur la nécessité de le combiner à d'autres types de pratiques pour obtenir des effets dépassant le seul plan musculaire. En effet, seulement 22 % des tests d'équilibre recensés ont montré des améliorations grâce au renforcement musculaire. Ainsi, conformément au principe de spécificité de l'entraînement, pour agir plus efficacement sur l'équilibre, il semble donc nécessaire d'intégrer des exercices spécifiquement conçus pour cibler cette fonction (Shimada et al., 2003). Cette composante est particulièrement importante chez les personnes âgées car elle est liée au risque de chute. Dans ce sens, les entraînements comprenant plusieurs modalités (e.g., renforcement musculaire, équilibre, endurance), inclus dans la revue de Sherrington et al. (2020), ont rapporté une réduction significative du nombre de chutes d'une moyenne de 34 %. Conformément aux résultats présentés, l'entraînement combinant plusieurs modalités (notamment aérobie, renforcement musculaire, équilibre et souplesse, tel que recommandé par l'*American College of Sports Medicine* (ACSM), pourrait générer des bénéfices sur un large éventail de capacités physiques et motrices.

Outre les effets spécifiques de chaque composante, l'entraînement combinant plusieurs modalités pourrait aussi produire des effets cumulatifs et complémentaires, en raison de la diversité des stimulations qu'il implique (Ferketich et al., 1998 ; Nelson et al., 2007 ; Wood et al., 2001). La méta-analyse de Falck et al. (2019) a cherché à savoir si la combinaison de la stimulation aérobie et du renforcement musculaire, incluant pour quelques programmes des exercices d'équilibre et de souplesse, générait des bénéfices supérieurs à ceux observés avec chaque modalité isolée. Ils n'ont pas révélé de différences significatives entre les types de programmes, cependant, les auteurs recommandent tout de même de privilégier les interventions les plus riches et variées possibles. Par ailleurs, les résultats de

cette étude indiquent que l'activité physique produit des effets marqués sur les capacités fonctionnelles et la force musculaire, ainsi que des effets modestes sur l'équilibre et la souplesse. En revanche, aucun effet significatif n'a été observé sur la vitesse de marche, ni sur le risque de chute. Ces résultats diffèrent de ceux rapportés dans la méta-analyse de Chou et al. (2012), dans laquelle les auteurs ont montré que l'entraînement physique (tout type) améliorait à la fois la vitesse de marche et l'équilibre. En revanche, la performance au TUG [utilisé par Falck et al. (2019) comme indicateur de capacité fonctionnelle] n'était pas significativement améliorée. Cette divergence peut s'expliquer par les différences méthodologiques entre les deux méta-analyses. Chou et al. (2012) ont inclus un plus petit nombre d'études [48 contre 78 pour Falck et al. (2019)], mais ont regroupé sous un même terme « activité physique » des interventions très variées (e.g., Taï-chi, musculation, entraînement aérobie), sans distinction par modalité. Ainsi, ces divergences suggèrent que chaque type d'exercice pourrait induire des bénéfices spécifiques. Il apparaît donc pertinent de poursuivre les recherches avec des protocoles ciblant précisément chaque modalité pour mieux comprendre leurs effets différenciés.

2.1.3. Mécanismes physiologiques impliqués dans les effets de l'activité physique

2.1.3.1. Adaptations cardiovasculaires à l'entraînement

L'entraînement régulier, notamment aérobie, induit des adaptations cardiovasculaires centrales (cardiaques) et périphériques (vasculaires), jouant un rôle fondamental dans la prévention du déclin lié à l'âge. Ces adaptations influencent aussi bien les capacités physiques, notamment les capacités aérobies, motrices, que les capacités cognitives.

Les adaptations cardiovasculaires centrales concernent majoritairement une augmentation du débit cardiaque résultant principalement d'une élévation du volume d'éjection systolique et d'une réduction de la fréquence cardiaque de repos, traduisant une meilleure efficacité cardiaque globale (Fleg, 2012 ; Nystoriak & Bhatnagar, 2018). Ces effets sont attribuables à des modifications morphologiques cardiaques, telles qu'une dilatation du ventricule gauche et une hypertrophie cardiaque ainsi qu'à un remodelage vasculaire. Sur le plan périphérique, des adaptations vasculaires sont également observées. L'entraînement stimule des processus d'angiogenèse (formation de nouveaux capillaires) au niveau des muscles entraînés, médiés par la libération de BDNF (*Brain-Derived Neurotrophic Factor*) et de facteurs de croissance vasculaires (VEGF), ce qui améliore la perfusion tissulaire et l'oxygénation musculaire (da Silva et al., 2024). L'artériogenèse, c'est-à-dire le remodelage et l'augmentation du calibre des artères et artérioles, contribue également à optimiser le débit sanguin. La fonction endothéliale est en parallèle améliorée, notamment par une production accrue de monoxyde d'azote, un puissant vasodilatateur. Ces

mécanismes facilitent l'écoulement du sang en diminuant les résistances vasculaires, un facteur majeur de risque cardiovasculaire chez les personnes âgées. À terme, cela se traduit par une amélioration du VO_2max. Ces effets sont généralement attribuables à l'entraînement aérobie, mais également à des formes combinées (aérobie et renforcement musculaire) comme le démontre la récente méta-analyse de da Silva et al. (2024) sur l'amélioration de la fonction endothéliale et la réduction de la rigidité artérielle chez les personnes âgées.

2.1.3.2. Adaptations musculaires et motrices à l'entraînement

Les muscles squelettiques présentent une capacité d'adaptation aux différentes sollicitations, notamment à l'entraînement physique (renforcement musculaire, aérobie). Ce phénomène est désigné par le terme de plasticité musculaire. La nature de ces adaptations dépend étroitement du type d'entraînement réalisé. L'entraînement en résistance provoque de manière prédominante une augmentation de la masse musculaire, liée à l'accroissement du diamètre des fibres, surtout de type II. Il entraîne également une augmentation de la synthèse de protéines contractiles (actine, myosine), un renforcement des structures conjonctives et tendineuses, ainsi que des adaptations neuromusculaires (meilleure activation et synchronisation des unités motrices). Différents types d'entraînements existent (e.g., endurance musculaire, hypertrophie, force maximale), mais leurs effets ne seront pas détaillés ici. L'entraînement aérobie conduit à un développement de la masse musculaire plus limité, mais améliore principalement la capacité oxydative des fibres. Les adaptations concernent principalement les fibres lentes de type I, ainsi que les fibres intermédiaires de type IIA (lors d'efforts d'intensité élevée).

L'entraînement, notamment moteur, induit des adaptations au niveau des systèmes neuromusculaires et sensorimoteurs qui permettent d'améliorer la coordination, la précision et l'efficacité du mouvement (Voelcker-Rehage & Niemann, 2013). Les mouvements moteurs complexes requièrent des processus perceptifs et cognitifs de haut niveau, moins sollicités dans les mouvements grandement automatisés comme la marche ou le vélo utilisés dans l'entraînement aérobie. Sur le plan central, l'entraînement moteur favorise une réorganisation fonctionnelle et structurelle des réseaux cérébraux impliqués dans la planification et le contrôle des mouvements (Seidler et al., 2010). Il est notamment observé une amélioration de l'intégration sensorimotrice et de la sélection des réponses motrices, un renforcement des connexions, en particulier au niveau du cervelet et des ganglions de la base et une activation plus efficiente des régions préfrontales et pariétales lors de tâches complexes, traduisant ainsi une meilleure allocation des ressources attentionnelles et exécutives (Seidler et al., 2010 ; Voelcker-Rehage et al., 2011). Sur le plan périphérique, l'entraînement moteur induit une optimisation du recrutement et de la synchronisation des unités motrices, une diminution de la co-activation

musculaire parasite (Nagai et al., 2012) réduisant le coût énergétique du mouvement et une amélioration de la proprioception et de la régulation posturale, notamment via des adaptations au niveau des récepteurs vestibulaires.

Les adaptations physiques et motrices présentées témoignent de l'influence de l'entraînement auprès des personnes âgées. Toutefois, ses effets ne se limitent pas à la dimension corporelle : l'entraînement produit également des effets sur les capacités cognitives, constituant un enjeu majeur dans la prévention du déclin lié à l'âge.

2.2. Effets, modalités et mécanismes de l'activité physique sur les capacités cognitives

2.2.1. Rôle de l'entraînement aérobie dans les effets cognitifs

Pendant de nombreuses années, de multiples recherches se sont centrées sur l'activité physique aérobie, perçue comme particulièrement efficace pour améliorer les fonctions cognitives des personnes âgées (Colcombe & Kramer, 2003 ; Smith et al., 2010). Dans leur méta-analyse, Colcombe et Kramer (2003) indiquent que l'activité physique est associée à une amélioration de plusieurs fonctions cognitives, avec des effets plus prononcés sur les fonctions exécutives, chez les personnes âgées de 55 à 80 ans. L'activité physique, spécifiquement lorsqu'elle inclut de l'activité aérobie, améliore les fonctions cognitives, incluant la mémoire, l'attention, la vitesse de traitement de l'information et les fonctions exécutives (Smith et al., 2010). L'amélioration de la condition aérobie entraînerait une cascade de mécanismes neurophysiologiques présentés dans la partie 2.2.4 de ce chapitre (Colcombe et al., 2004, 2006 ; Pereira et al., 2007). Une intensité modérée à élevée semble requise pour induire ces adaptations. Toutefois, certaines études montrent que le suivi d'un entraînement aérobie et/ou les gains en forme cardiovasculaire ne sont pas systématiquement associés à de meilleures performances cognitives (Diamond & Ling, 2019a ; Etnier et al., 2006 ; Kelly et al., 2014 ; Smiley-Oyen et al., 2008). De plus, des interventions basées sur d'autres modalités, comme le renforcement musculaire ou l'entraînement moteur global (e.g., coordination, équilibre), se sont également révélées efficaces pour améliorer la cognition chez les personnes âgées (Cassilhas et al., 2007 ; Forte et al., 2013 ; Voelcker-Rehage et al., 2011) via des mécanismes cognitifs potentiellement distincts (voir partie 2.2.2 de ce chapitre). Ainsi, bien que l'entraînement physique aérobie ait montré des effets intéressants auprès des personnes âgées, les bénéfices cognitifs restent variables et d'autres formes d'entraînement peuvent être efficaces.

2.2.2. Autres formes d'activités physiques et effets différenciés sur la cognition

Le renforcement musculaire apparaît bénéfique pour les fonctions cognitives des personnes âgées dans certaines études (Bherer et al., 2013 ; Kelly et al., 2014). Par exemple, Cassilhas et al. (2007) ont démontré que six mois d'entraînement en résistance modérée ou intense, trois fois 1 h par semaine, amélioraient la mémoire à court terme, l'attention et plusieurs fonctions exécutives (raisonnement, mémoire de travail visuospatiale) chez des hommes âgés de 65 à 75 ans. De plus, une augmentation des concentrations sériques du facteur de croissance analogue à l'insuline-1 (IGF-1, *Insulin-like Growth Factor 1*) a été observée. Liu-Ambrose et ses collègues (2010) ont également démontré que 12 mois d'entraînement en résistance progressive amélioraient l'inhibition chez des femmes âgées de 65 à 75 ans. Ainsi, d'autres modalités que l'entraînement aérobie peuvent également générer des bénéfices cognitifs.

Plusieurs méta-analyses (Colcombe & Kramer, 2003 ; Etnier et al., 2006) soulignent l'importance de s'intéresser aux effets spécifiques des différentes modalités physiques et motrices (e.g., aérobie, renforcement musculaire, habiletés motrices complexes). Dans cette perspective, les résultats de Voelcker-Rehage et al. (2010) indiquent que la condition physique (évaluée par les auteurs via la capacité cardiovasculaire et la force musculaire) et motrice (évaluée via la vitesse du mouvement, l'équilibre, la coordination motrice et la souplesse) sont toutes deux associées positivement aux performances cognitives, notamment au contrôle exécutif et à la vitesse de traitement. Toutefois, elles entraînent des schémas d'activation cérébrale distincts. Plus précisément, chez les personnes âgées, un bon niveau de condition physique et motrice est associé à un traitement cognitif plus efficace reflété par une activation corticale moindre dans les zones responsables du contrôle exécutif (cortex frontal supérieur et moyen), tandis qu'un bon niveau de condition motrice est également lié à une activation accrue des régions impliquées dans le traitement visuospatiale. Ces deux profils semblent refléter des stratégies cognitives différentes mais efficaces, traduisant une utilisation plus efficiente des ressources cérébrales. La nature des stimulations physiques et motrices pourrait orienter des adaptations cognitives et cérébrales différenciées.

Ainsi, plusieurs études se sont intéressées à la comparaison des effets des modalités d'entraînement sur les fonctions cognitives, et notamment de l'entraînement physique (aérobie ou renforcement musculaire) et moteur. Diamond et Ling (2016, 2019b, 2019a) différencient les activités

physiques avec des exigences cognitives et motrices minimales[1] (ici relatives à l'entraînement physique), des activités physiques intégrant des exigences cognitives et motrices importantes[2] (e.g., habiletés motrices complexes). Comme l'entraînement aux habiletés motrices complexes mobilise davantage de ressources cognitives chez les personnes âgées que chez les jeunes adultes, il est supposé que ce type d'entraînement puisse être particulièrement efficace (Netz, 2019). L'entraînement moteur agirait directement sur la cognition, avec des effets médiés par la complexité des tâches (Netz, 2019). L'entraînement physique, quant à lui, aurait des effets sur la cognition de manière globale via l'amélioration de la condition cardiovasculaire, effets médiés par l'intensité de l'entraînement.

Berryman et al. (2014) montrent qu'un entraînement de la motricité globale (i.e., exercices d'étirement, de relaxation, de locomotion, de coordination, de jonglage et d'équilibre) sur 8 semaines entraîne des bénéfices cognitifs similaires, notamment sur l'inhibition, à ceux observés par un entraînement combinant renforcement musculaire et aérobie. Une étude de Voelcker-Rehage et al. (2011) comparant un programme aérobie à un programme de coordination auprès de personnes âgées de 62 à 79 ans, a montré pour les deux entraînements des gains cognitifs, mesurés par une diminution de l'activation du cortex préfontal pendant un test exécutif, résultat interprété par les auteurs comme un gain d'efficacité dans le traitement de l'information. Par ailleurs, l'entraînement cardiovasculaire a été associé à une augmentation de l'activation du réseau sensorimoteur, tandis que l'entraînement de coordination a été associé à une activation accrue du réseau visuospatial. Cette même équipe a montré que seule la condition motrice, et non la condition physique, était associée au volume hippocampique (Niemann et al., 2014), bien qu'un entraînement d'un an soit de coordination, soit d'aérobie, améliorait le volume de l'hippocampe de manière similaire. De plus, Forte et al. (2013) rapportent des effets sur l'inhibition après un programme avec plusieurs composantes motrices (coordination, équilibre) et un programme de renforcement musculaire de 3 mois. Les auteurs suggèrent que l'entraînement avec plusieurs composantes aurait un effet direct sur l'inhibition, alors que l'entraînement en résistance agirait indirectement via des gains en force musculaire. Ainsi, plutôt que d'être médiés par les bénéfices généraux de la condition physique, les changements cognitifs induits par la stimulation motrice pourraient résulter directement de la sollicitation de processus neuronaux liés à des mouvements cognitivement exigeants (Forte et al., 2013).

[1] Le terme « *mindless* » (en français : inconsciente, sans refléxion) est utilisé par les autrices dans leur article de 2016. Il est modifié par les auteurs par « *plain exercises* » (en français : exercices basiques) dans leurs articles de 2019, suite à la critique d'Hillman et al. (2019).

[2] Les autrices utilisent le terme « *enriched exercise* » (en français : exercices enrichis).

L'intégration de plusieurs composantes, et notamment de la coordination ou plus généralement de la sollicitation d'habiletés motrices complexes, semble importante pour entraîner des effets cognitifs. Dans ce sens, une méta-analyse a conclu que l'un des facteurs modérateurs les plus influents de l'effet de l'activité physique sur les fonctions cognitives est le type d'exercice (Ludyga et al., 2020). L'entraînement en coordination était le plus efficace, comparativement à l'entraînement aérobie et/ou de résistance musculaire, potentiellement en raison de la demande cognitive inhérente (Ludyga et al., 2020). Ces résultats sont en accord avec Diamond et Ling (2019a) qui indiquent que le lien entre l'ampleur des bénéfices exécutifs de l'entraînement aérobie est dépendant du type d'habileté motrice et/ou de l'exigence cognitive soutenant l'effort aérobie (e.g., coordination du corps entier ou coordination multi-segments). Leurs résultats ont souligné l'importance des aspects qualitatifs des interventions physiques (e.g., nature des exercices), en plus des dimensions quantitatives (e.g., intensité, durée, fréquence) (voir Pesce, 2012 pour un point de vue convergent).

2.2.3. Vers une approche globale de l'activité physique pour la santé cognitive

Dès 2006, la méta-analyse d'Etnier et ses collaborateurs (2006) intégrant 37 études avec des participants âgés de 17 à 83 ans, suggérait que l'amélioration des capacités aérobies n'explique pas la totalité de la variation cognitive des personnes âgées. Dans ce sens, Colcombe et Kramer (2003) ont montré que les programmes excellant pour améliorer les fonctions cognitives étaient composés certes d'activité physique aérobie, mais qu'il était nécessaire de la combiner à du renforcement musculaire, de la souplesse et de l'équilibre. Torre et Temprado (2022), dans une revue basée sur 24 études, toutes réalisées auprès de personnes âgées, comparent les entraînements cognitivo-physique, cognitivo-moteur et multi-domaine (cognitif, physique et moteur) et soutiennent également la pertinence d'inclure des exercices sollicitant la motricité générale, associés à une stimulation aérobie et au renforcement musculaire. De plus, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (2020) recommande aux seniors la pratique d'une activité physique aérobie, de renforcement musculaire ainsi que d'activités physiques variées et à plusieurs composantes, mettant l'accent sur l'équilibre fonctionnel. Enfin, la dimension sociale des différentes activités doit être prise en compte, notamment lorsqu'il s'agit de personnes âgées. La pratique collective, incluant la coopération et l'opposition, est encouragée par plusieurs chercheurs qui soulignent son intérêt sur l'aspect cognitif (Audiffren et al., 2011 ; Elferink-Gemser et al., 2018 ; Vestberg et al., 2012 ; Voelcker-Rehage et al., 2011). Cet axe est approfondi dans la partie 4.1 du chapitre 4.

En tenant compte de l'ensemble des éléments présentés, il apparaît que plusieurs voies complémentaires permettent aux personnes âgées d'améliorer leurs fonctions cognitives via l'activité

physique (Dupuy et al., 2024), et que la mobilisation d'habiletés motrices complexes, couplée à un entraînement aérobie et de renforcement musculaire semble pertinente. Les effets cognitifs ne relèvent pas uniquement d'adaptations comportementales, mais reposent également sur l'activation de plusieurs mécanismes neurophysiologiques.

2.2.4. Mécanismes neurophysiologiques impliqués dans les effets cognitifs

Plusieurs mécanismes neurophysiologiques entrent en jeu lors de la pratique d'activités physiques. Ces mécanismes font l'objet de quatre principales hypothèses : i) augmentation du flux sanguin, ii) l'augmentation de la plasticité synaptique, iii) l'augmentation de la neurogenèse, iv) l'augmentation des catécholamines cérébrales. Ces quatre mécanismes pourraient converger autour d'un processus commun : l'hypothèse neurotrophique, selon laquelle l'exercice favorise la sécrétion de facteurs soutenant la plasticité cérébrale.

2.2.4.1. Hypothèse circulatoire

L'hypothèse de l'augmentation du flux sanguin cérébral suppose que l'activité physique aérobie entraînerait une amélioration de l'aptitude cardiovasculaire (Kramer et al., 1999), générant une augmentation de la perfusion cérébrale et du flux sanguin régional, conduisant à l'apparition de nouveaux capillaires cérébraux (angiogenèse), notamment dans les régions frontales (Chapman et al., 2013). L'activité physique aérobie pourrait ainsi contribuer à maintenir, voire améliorer l'intégrité hémodynamique des régions cérébrales particulièrement sensibles aux réductions du flux sanguin avec l'âge, et responsables des fonctions exécutives.

Cela pourrait se traduire par une préservation ou une amélioration des performances cognitives au cours du vieillissement (Audiffren et al., 2011). De plus, l'angiogenèse constitue aussi un terrain favorable à d'autres processus plastiques, comme la neurogenèse (décrite dans la section suivante). Des activités régulières d'intensité modérée à élevée sont nécessaires pour observer ces effets, lesquels sont majoritairement médiés par les mécanismes cardiovasculaires présentés dans la partie 2.1.3.1 du chapitre 3.

2.2.4.2. Hypothèse de l'augmentation de la neurogenèse

Pereira et ses collaborateurs (2007) font partie des premiers auteurs à avoir mis en évidence, chez l'humain, un corrélat indirect de la neurogenèse (i.e., création de nouvelles cellules nerveuses et neuronales) avec l'activité physique aérobie dans le gyrus denté de l'hippocampe, région critique pour

la mémoire et vulnérable au vieillissement. Leur étude a montré qu'un programme d'entraînement cardiorespiratoire chez de jeunes adultes entraînait une augmentation du flux sanguin cérébral dans cette région, associée à une amélioration de la condition physique et à de meilleures performances à un test de mémoire verbale (*Rey Auditory Verbal Learning Test*). Les auteurs interprètent l'augmentation du flux sanguin dans cette région comme un marqueur indirect de la neurogenèse, étant donné le couplage bien établi entre neurogenèse et angiogenèse observé dans les modèles animaux.

D'autres études ont exploré l'idée selon laquelle l'activité physique, en particulier d'intensité modérée à élevée, stimulerait la neurogenèse dans l'hippocampe. Le travail d'Erickson et al. (2011) représente une contribution importante dans ce domaine. Les auteurs ont montré qu'un programme d'exercice aérobie d'un an chez des adultes de 60 à 80 ans entraînait une augmentation du volume de l'hippocampe (augmentation de 2 %), alors qu'un groupe contrôle (étirement) présentait un déclin (diminution de 1,4 %). L'augmentation de volume était associée à une amélioration des performances en mémoire spatiale, ainsi qu'à une hausse des niveaux de BDNF, un médiateur de la neurogenèse, dans le gyrus denté. Ainsi, l'entraînement aérobie est capable d'inverser partiellement la perte de volume hippocampique liée à l'âge. L'étude de Niemann et al. (2014) montre des résultats similaires sur l'augmentation du volume de l'hippocampe, à la suite d'un entraînement d'un an, soit aérobie, soit de coordination. Par ailleurs, certains auteurs (Kempermann, 2019 ; Voss et al., 2013) soulignent que la neurogenèse hippocampique décline fortement avec l'âge, mais que les effets bénéfiques de l'activité physique perdurent, non pas tant par la création de nouveaux neurones, mais via des mécanismes alternatifs tels que l'angiogenèse et la synaptogenèse.

2.2.4.3. Hypothèse de l'augmentation de la plasticité synaptique

Cette hypothèse considère que sous l'effet de nouvelles expériences sensorielles et motrices liées à la pratique d'activités physiques, le réseau de connectivité neuronale se modifie en créant de nouvelles connexions (synaptogenèse) ou en renforçant l'efficacité de la transmission synaptique de certaines connexions (potentialisation à long terme). La nouveauté et la complexité des stimuli moteurs seraient des éléments clés dans cette plasticité fonctionnelle (Kempermann et al., 2010 ; Voelcker-Rehage & Niemann, 2013). Les tâches de coordination seraient ainsi efficaces pour stimuler la plasticité synaptique.

2.2.4.4. Hypothèse de l'augmentation des catécholamines cérébrales

L'hypothèse des catécholamines cérébrales, ou hypothèse dopaminergique, considère que l'exercice chronique aérobie provoque une libération cérébrale de catécholamines (dopamine, noradrénaline) entraînant une augmentation des récepteurs dopaminergiques, notamment dans les régions préfrontales (Voss et al., 2013). Le vieillissement s'accompagne généralement d'une dégradation des voies dopaminergiques. Une diminution de la concentration de dopamine cérébrale et une baisse de son efficacité ont été observées dans le vieillissement normal, altérant le fonctionnement des capacités exécutives.

2.2.4.5. Hypothèse neurotrophique

Ces quatre hypothèses seraient toutes sous-tendues par un même mécanisme commun : la libération de facteurs neurotrophiques. Ces facteurs favorisent la plasticité cérébrale, tels que l'angiogenèse, la neurogenèse, la synaptogenèse et la synthèse de neurotransmetteurs. Les trois principaux facteurs identifiés sont : i) le BDNF, protéine essentielle à la plasticité et à la neurogenèse hippocampique, ii) le VEGF, stimulant l'angiogenèse, et iii) l'IGF-1, impliqué dans la neurogenèse et l'angiogenèse.

Netz (2019) indique que les entraînements aérobies et en renforcement musculaire, constitués majoritairement de mouvements automatiques et répétitifs, mobilisent des processus métaboliques et énergétiques qui influencent la neuroplasticité. Un certain niveau d'intensité, exprimé en termes d'effort cardiorespiratoire ou musculaire, est ainsi nécessaire. En revanche, pour l'entraînement moteur, ce serait la complexité de la tâche qui influencerait la neuroplasticité. Par ailleurs, il est compliqué de mesurer la complexité de façon quantitative.

Les effets chroniques de l'activité physique sur les fonctions cognitives mettent en évidence son rôle majeur lors du vieillissement. Toutefois, ces effets restent souvent examinés dans des conditions expérimentales relativement isolées, qui ne reflètent pas toujours les exigences des activités quotidiennes. L'évaluation des effets sur les capacités de DT offre une approche complémentaire particulièrement pertinente.

2.3. Effets de l'activité physique sur les capacités de double-tâche

La recherche sur les effets de l'activité physique sur les capacités de DT s'est développée plus récemment que les travaux portant sur les fonctions physiques, motrices ou cognitives isolées. De plus,

la majorité des études menée à ce jour sur les capacités de DT a porté sur des programmes combinant activité physique et entraînement cognitif, dont les résultats sont traités dans le chapitre 4. Il est pertinent de distinguer ici les effets potentiels de l'activité physique seule sur les performances en DT, en différenciant deux formes : la DT cognitivo-cognitive (deux tâches cognitives simultanées) et la DT cognitivo-motrice (tâche cognitive couplée à une tâche motrice).

2.3.1. Double-tâche cognitivo-cognitive

Les études isolant l'effet de l'activité physique sur la DT cognitivo-cognitive sont peu nombreuses et leurs résultats restent contrastés (e.g., Bherer et al., 2020, 2021 ; Hawkins et al., 1992 ; Madden et al., 1989). Certaines recherches suggèrent un effet positif potentiel de l'entraînement aérobie, tandis que d'autres n'observent aucune amélioration significative. Par exemple, Madden et ses collaborateurs (1989) n'ont constaté aucune amélioration des temps de réaction dans un paradigme de DT cognitivo-cognitive après 16 semaines d'entraînement aérobie ou de yoga chez des adultes âgés de 60 à 83 ans, malgré une amélioration de la condition cardiorespiratoire. À l'inverse, Hawkins et al. (1992) ont rapporté une diminution des temps de réaction en situation de DT, suite à un entraînement aquatique aérobie de 10 semaines chez des participants âgés de 63 à 82 ans. Hawkins et al. (1992) suggèrent que les différences méthodologiques, notamment dans la tâche d'évaluation, pourraient être à l'origine des divergences de résultats. En effet, le paradigme de DT de Madden et al. (1989) n'était potentiellement pas assez exigeant.

Plus récemment, Bherer et al. (2021) ont montré qu'un programme d'entraînement aérobie (12 semaines) permettait de réduire le coût du changement de tâche (*task-set cost*) mais non pas le coût de DT. Bherer et al. (2020) ont également montré que l'entraînement physique seul (aérobie, renforcement musculaire) ne permettait d'améliorer aucun des paramètres évalués de la DT (étude détaillée dans la partie 2.3). Ainsi, l'activité physique seule pourrait ne pas être suffisante pour améliorer globalement la performance dans les DT cognitivo-cognitives (Bherer et al., 2020, 2021). Les divergences observées dans ces résultats pourraient notamment être attribuées au degré d'amélioration de la condition physique obtenu au cours des programmes. Certaines études indiquent qu'une meilleure condition cardiorespiratoire pourrait prédire de meilleures performances en DT (Wong et al., 2015), ou au moins favoriser une meilleure préparation des réponses dans des tâches impliquant des temps de réaction (Renaud et al., 2010).

Même si les résultats de ces études sont contrastés, ils suggèrent un lien potentiel entre l'entraînement physique et la performance en DT cognitivo-cognitive, lien qui pourrait dépendre du

contenu du programme d'entraînement. Vrinceanu et al. (2021) ont comparé les effets de 12 semaines d'entraînements aérobie (vélo stationnaire, intensité continue et HIIT[1]), moteur complexe (marche, mobilité, équilibre, agilité, coordination) et cognitif (3 tâches à chaque séance : DT identique à la tâche d'évaluation, Stroop modifié, N-back) sur les performances en DT. La tâche d'évaluation consistait en deux tâches de discrimination visuelle, chacune associée à une main différente. Les participants devaient identifier des stimuli (animaux ou planètes) présentés à l'écran en appuyant sur les boutons correspondants avec la main gauche ou droite, selon la catégorie. Les résultats montrent que les plus fortes améliorations des temps de réaction en DT ont été observées dans le groupe cognitif, suivies du groupe moteur, tandis qu'aucun effet n'est constaté dans le groupe aérobie. De plus, le groupe cognitif a également amélioré la variabilité intra-individuelle des temps de réaction en DT, tandis que le groupe moteur a réduit le coût de DT. Ces données suggèrent que les programmes cognitifs et moteurs peuvent tous deux améliorer la performance en DT, mais qu'ils influencent différents aspects de cette performance. Par ailleurs, il est important de noter que le groupe cognitif réalisait un entraînement similaire de la tâche cognitive évaluée en DT (les auteurs précisent que les stimuli, les instructions et les feedbacks sont tout de même différents), reflétant un transfert proche selon la taxonomie de Barnett et Ceci (2002) (présentée dans la partie 1.3.2 du chapitre 3), alors que les améliorations dans le groupe moteur pourraient refléter un transfert éloigné.

2.3.2. Double-Tâche cognitivo-motrice

La DT cognitivo-motrice soulève des enjeux différents de ceux observés dans la DT cognitivo-cognitive, du fait de l'interaction entre les processus moteurs et cognitifs. Berryman et al. (2014) ont évalué les effets d'un programme de 3 séances par semaine pendant 8 semaines, incluant différentes modalités (aérobie et renforcement du haut du corps ou aérobie et renforcement du bas du corps ou tâches motrices globales[2]) auprès de 47 personnes âgées en moyenne de 71 ans. Les résultats indiquent notamment une amélioration de l'inhibition en DT, indépendamment du type de programme. Les auteurs attribuent les bénéfices du groupe « tâches motrices globales » à la complexité motrice des exercices, sollicitant la coordination et les capacités perceptives. Toutefois, certaines limites doivent être

[1] Le HIIT, *High-Intensity Interval Training*, implique des phases courtes et récurrentes d'intensité d'exercice proches du maximum (supérieures à 80 % de la fréquence cardiaque maximale) entrecoupées de phases de récupération à faible intensité (Gibala et al., 2012).

[2] Les deux premières semaines étaient consacrées principalement à des exercices de souplesse et de relaxation, les trois suivantes à des exercices de marche et de manipulation de balles, et les trois dernières à des situations de manipulation de balles, de jonglage et de jeux comme lancer une balle dans un panier.

notées : l'étude n'incluait pas de groupe contrôle et seule la performance cognitive en DT était mesurée (aucune information n'est donnée sur la performance motrice comme la variabilité de certains indices de la marche, bien que contrôlée par la vitesse automatique du tapis, ni sur l'effet de la DT). Les résultats de la méta-analyse de Plummer et al. (2015) confirment que l'activité physique améliore la vitesse de marche en situation de DT et réduit le coût de DT (*Dual-Task Cost,* DTC) sur cette même mesure. Par ailleurs, il est à noter que la moitié des études incluses porte sur des programmes d'entraînement spécifiquement en situation de DT. En revanche, la méta-analyse de Teraz et al. (2022), dont le protocole est détaillé dans la partie 2.2 du chapitre 4, comparant des programmes combinés (activité physique et entraînement cognitif), des programmes d'activité physique seule, et des groupes contrôles, n'a pas observé d'effet significatif sur la vitesse de marche en situation de DT (et aucune différence entre les groupes).

Les résultats relatifs à la DT cognitivo-cognitive restent globalement mitigés, et leur interprétation est complexifiée par la diversité des protocoles et des mesures. En revanche, les effets observés dans le cadre de la DT cognitivo-motrice concernent davantage la tâche motrice, notamment la vitesse de marche. Il convient également de souligner que la performance en DT est souvent évaluée de manière incomplète, certaines études ne mesurant qu'une seule des deux tâches (généralement la composante motrice dans les tâches cognitivo-motrices), sans toujours considérer les performances en situation de ST ou le calcul de la DTE.

2.4. Recommandations et freins à la pratique de l'activité physique

Les résultats présentés précédemment ont mis en évidence les effets potentiels de l'activité physique sur les fonctions physiques, motrices, cognitives et de DT. Toutefois, pour que ces effets soient observés, notamment de manière durable, il faut que l'activité physique soit pratiquée de manière régulière et adaptée. La question des conditions optimales de mise en œuvre, tout comme celle des obstacles à l'adoption et au maintien de la pratique, devient alors centrale, en particulier chez les personnes âgées qui sont les plus concernées par le déclin des domaines corporel et cognitif.

2.4.1. Recommandations

Les principales recommandations internationales pour les personnes âgées (ACSM, OMS, Bull et al., 2020 ; Colcombe & Kramer, 2003 ; Riebe et al., 2018) soulignent l'importance de suivre un programme d'activité physique à plusieurs composantes. Il est conseillé de pratiquer au moins 150 minutes par semaine d'activité physique aérobie d'intensité modérée, ou 75 minutes d'activité vigoureuse, réparties sur au moins trois jours. Une combinaison des deux intensités est également

possible. L'intensité de l'effort doit se situer entre 50 % et 85 % du VO_2max, ce qui correspond à un niveau d'effort perçu de 5 à 8 sur 10 sur l'échelle de Borg modifiée (Borg, 1982), évaluant le niveau d'effort perçu. En complément, un entraînement en renforcement musculaire est recommandé, comportant 8 à 10 exercices sollicitant les principaux groupes musculaires. Chaque exercice doit être répété 10 à 15 fois, avec un effort modéré à élevé. Des exercices de souplesse sont également conseillés au moins deux fois par semaine, en maintenant chaque étirement 10 à 30 secondes, avec 3 à 4 répétitions par groupe musculaire. Ils sont idéalement intégrés aux séances d'entraînement aérobie ou de renforcement musculaire. Chez les personnes à risque de chute, des exercices spécifiques d'équilibre sont fortement recommandés, trois fois par semaine. Ces exercices sont particulièrement efficaces lorsqu'ils sont intégrés à des programmes avec plusieurs modalités. Les interventions globales (aérobie, renforcement, équilibre, souplesse) montrent les meilleurs effets sur les capacités fonctionnelles et la prévention des chutes (Sherrington et al., 2020). De plus, Netz (2019) recommande d'intégrer davantage de stimulations cognitives, avec des tâches impliquant à la fois un mouvement et une tâche cognitive. Une supervision initiale est préconisée, notamment pour garantir la sécurité et l'efficacité du programme.

2.4.2. Freins à la pratique de l'activité physique

Malgré les effets connus de l'activité physique sur la santé, le niveau d'activité physique reste faible. Les données montrent qu'en 2022, près d'un tiers (31 %) des adultes dans le monde, soit environ 1,8 milliard de personnes, ne pratiquaient pas une activité physique conformément aux niveaux recommandés (Strain et al., 2024). Les résultats témoignent d'une tendance inquiétante à l'inactivité physique chez les adultes, celle-ci ayant progressé d'environ 5 points de pourcentage entre 2010 et 2022 (Strain et al., 2024). Plus particulièrement, avec l'avancée en âge, une diminution de la participation aux activités physiques est observée (Strain et al., 2024). Cette réduction de l'engagement dans l'activité physique contribue à un cercle vicieux de déclin, où la baisse des capacités physiques, motrices et cognitives limite encore davantage la pratique. L'inactivité physique est reconnue comme un facteur de risque pour le déclin cognitif et la démence (Cunningham et al., 2020). À l'inverse, comme indiqué précédemment, l'activité physique régulière apparaît comme une stratégie prometteuse pour renforcer les capacités physiques, motrices et cognitives. Dans ce contexte, le développement d'interventions ciblées, accessibles et motivantes est essentiel pour contrer les effets délétères de l'inactivité physique

Les principaux freins à la pratique d'activités physiques concernent les limitations physiques liées à des problèmes de santé ou au vieillissement, le manque de conseils professionnels et la perception de soi comme trop âgé pour pratiquer une activité physique (Bethancourt et al., 2014 ; Spiteri et al., 2019).

Plusieurs travaux mettent en évidence les difficultés de compliance[1] à long terme aux programmes d'activités physiques chez les personnes âgées, en particulier lorsqu'ils reposent sur des formats traditionnels. Picorelli et al. (2014) ont ainsi montré que moins de 60 % des participantes âgées adhéraient durablement à des programmes de renforcement musculaire ou d'aérobie. De leur côté, Valenzuela et al. (2018) ont rapporté, dans une revue systématique, des taux de compliance plus élevés dans des programmes d'exercices assistés par la technologie que dans les programmes traditionnels, suggérant que l'introduction d'éléments interactifs et/ou ludiques peut accroître l'engagement grâce au niveau de plaisir élevé qu'ils procurent. En effet, Maillot et al. (2018) ont montré que chez les personnes âgées, le plaisir et le besoin de rester en bonne santé sont les principaux prédicteurs d'un haut niveau d'autodétermination à la pratique d'une activité physique régulière. Ces résultats soulignent l'importance d'adapter les modalités d'intervention pour favoriser une pratique régulière et durable.

3. EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT COGNITIF SUR LES FONCTIONS COGNITIVES : TYPES D'INTERVENTIONS ET MÉCANISMES

À l'instar de l'activité physique, l'entraînement cognitif fait l'objet de nombreuses recherches dans le champ du vieillissement cognitif, explorant son potentiel à maintenir, voire améliorer, les fonctions cognitives chez les personnes âgées. Cette section examine les effets cognitifs de l'entraînement cognitif, et plus particulièrement ceux des Jeux Vidéo (JV) sédentaires.

3.1. Typologies des stimulations cognitives

Fissler et ses collaborateurs (2013) distinguent deux approches traditionnelles d'entraînement cognitif (Figure 4) : les interventions basées sur les processus (*process-based cognitive training*) et celles centrées sur la nouveauté (*novelty intervention)*.

3.1.1. Entraînements cognitifs basés sur le processus

L'entraînement cognitif basé sur les processus est défini comme une pratique répétée sur des tâches standardisées, ciblant un ou plusieurs processus spécifiques comme la mémoire de travail ou le changement de tâche (Fissler et al., 2013 ; Gates & Valenzuela, 2010). Il s'agit par exemple de tâches de N-back, de Go/no-go ou de discrimination sensorielle (d'autres exemples sont présentés dans la Figure 4).

[1] Degré auquel un participant réalise les séances conformément aux modalités prévues (e.g., nombre de séances réalisées par rapport au nombre de séances totales proposées).

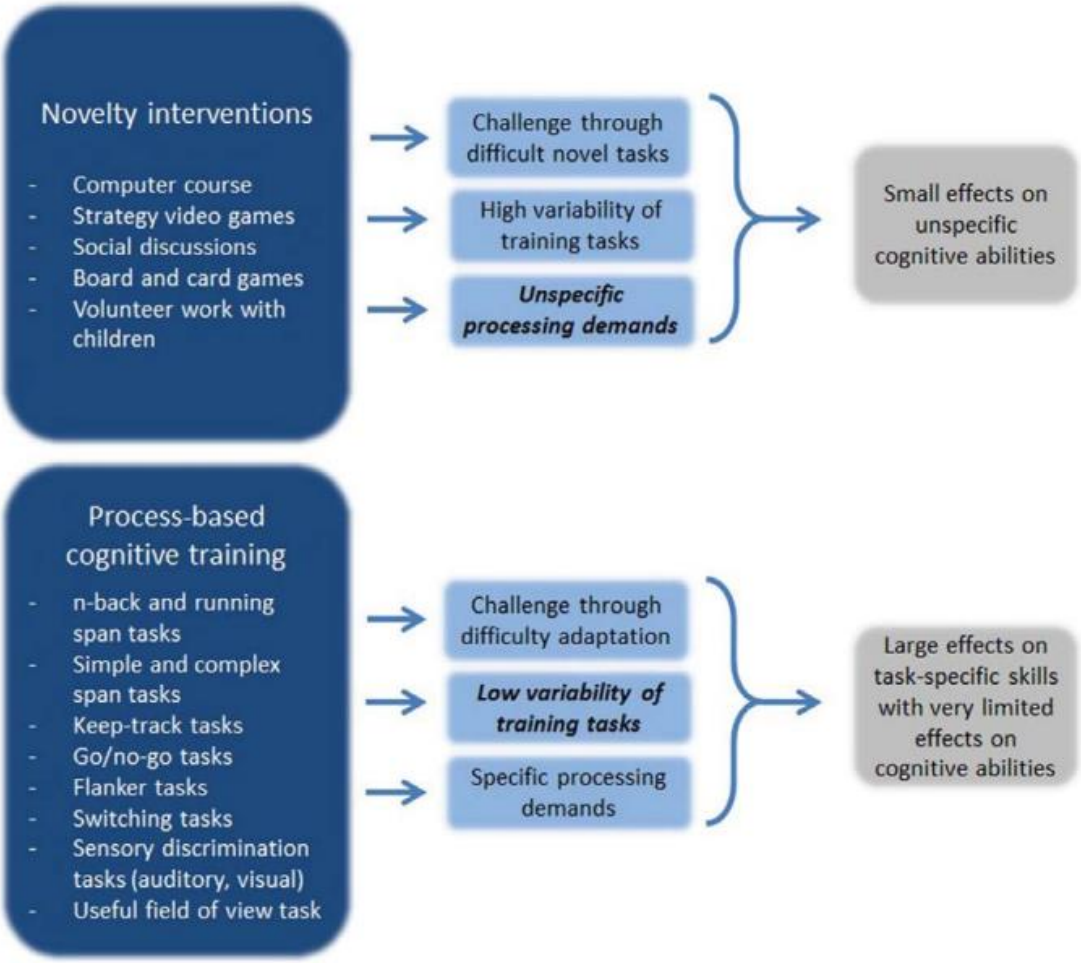


Figure 4. Approches cognitives traditionnelles
(Fissler et al., 2013)

L'entraînement basé sur le processus améliorerait uniquement les performances dans des tests cognitifs similaires aux tâches d'entraînement (transfert proche), avec des effets inconsistants concernant les transferts plus éloignés. Fissler et al. (2013) supposent que cette spécificité de l'apprentissage est due à une faible variabilité des tâches d'entraînement. Ce type d'entraînement a montré des effets positifs sur certaines performances cognitives non entraînées (Hindin & Zelinski, 2012 ; Jaeggi et al., 2008 ; Karbach & Kray, 2009). Toutefois, le débat persiste concernant la présence d'un transfert éloigné (Lövdén et al., 2013 ; Schmiedek et al., 2010). Ce débat est alimenté par des limites méthodologiques fréquentes, comme l'absence de groupes témoins actifs ou l'utilisation de tests trop similaires aux tâches d'entraînement (Dahlin et al., 2008).

3.1.2. Entraînements basés sur la nouveauté

Les interventions basées sur la nouveauté mobilisent une variété de tâches difficiles et nouvelles, motivantes et proches de la vie réelle (Carlson et al., 2008 ; Klusmann et al., 2010), favorisant une variabilité et une stimulation cognitive plus globale (des exemples sont présentés dans la Figure 4) que les entraînements basés sur le processus. Bien qu'elles ne ciblent pas toujours des processus cognitifs précis, elles présentent des effets bénéfiques plus cohérents sur les fonctions cognitives, en particulier chez les personnes âgées (Fissler et al., 2013 ; Fritsch et al., 2005). Souvent, ces interventions sont intrinsèquement motivantes, liées à la vie réelle et mises en œuvre dans un contexte social (e.g., Carlson et al., 2008 ; Cheng et al., 2012 ; Klusmann et al., 2010). Ainsi, un intérêt croissant porte sur ces interventions comme levier de prévention du déclin cognitif.

Des activités variées et stimulantes, comme apprendre de nouvelles compétences, jouer à des jeux complexes ou participer à des cours d'informatique, sont associées à de meilleurs résultats cognitifs et à un risque réduit de développer une démence (Klusmann et al., 2010). En résumé, les interventions basées sur la nouveauté ont montré des effets intéressants et plutôt constants sur les résultats cognitifs, indiquant une amélioration des capacités cognitives. Contrairement aux entraînements cognitifs centrés sur les processus, les tâches des interventions basées sur la nouveauté diffèrent davantage des tests cognitifs utilisés. L'une des stratégies de l'entraînement, fondée sur la nouveauté via les JV, est de plus en plus étudiée auprès de personnes âgées (e.g., Basak et al., 2008 ; Perrot et al., 2019).

3.2. Jeux vidéo et fonctionnement cognitif

Dans la continuité des interventions basées sur la nouveauté, les JV ont suscité un intérêt croissant comme outil de stimulation cognitive, en particulier chez les personnes âgées. Par leur dimension interactive, leur complexité et leur forte capacité d'engagement, ces jeux constituent des environnements cognitivement exigeants. Au croisement de l'entraînement cognitif et des activités de loisirs, les JV représentent une forme hybride d'intervention, dont les effets sont de plus en plus étudiés dans la littérature.

3.2.1. Définitions

Le JV se définit comme une activité ludique impliquant une interaction de l'utilisateur avec une interface informatique générant un retour visuel sur un appareil vidéo. Trois caractéristiques techniques définissent le JV : i) une interface utilisateur (e.g., clavier, souris, manette, boutons), ii) une interactivité (l'action du joueur influe sur le jeu) et iii) une représentation vidéo. Les discours publics renvoient à des

préoccupations associées à l'effet négatif que peuvent avoir les JV sur les joueurs (i.e., addiction, agressivité, inactivité physique, sédentarité, manque de sollicitation sociale). Cependant, la littérature scientifique semble mettre en évidence de façon croissante le potentiel des JV comme modérateurs des effets de l'âge sur les performances cognitives, consistant en une approche d'intervention informatisée populaire. Par rapport aux programmes traditionnels d'entraînement cognitif, les JV présentent plusieurs atouts : ils sont relativement peu coûteux, agréables et amusants (Ballesteros et al., 2018).

Deux catégories de JV se distinguent (Figure 5) en fonction du degré de stimulation physique : les JV actifs et les JV sédentaires (Besombes & Maillot, 2018). Les JV actifs, aussi appelés exergames, comme la *Nintendo Switch* ou la *Xbox Kinect*, sont réalisés debout et nécessitent des mouvements pour jouer. Une partie (4.2 du chapitre 4) de ce cadre théorique y est consacrée. Ici sont abordés uniquement les JV sédentaires, qui entraînent une dépense énergétique et des mouvements limités ou négligeables, et sont joués en position assise. Les JV sédentaires peuvent être divisés en deux modalités : les JV moteurs et les JV non moteurs. Pour ces derniers, la performance au jeu n'est pas déterminée par les compétences motrices mobilisées pour utiliser les différents dispositifs de contrôle (e.g., clavier, souris, joystick), à l'inverse des jeux vidéo moteurs.

Parmi les JV sédentaires, quatre grands types de JV se distinguent (i.e., action, stratégie, cérébraux, casual). Les JV d'action (généralement moteurs), nécessitent des réponses rapides et une coordination œil-main, comme les jeux de tir ou de course (e.g., *Mario Kart, Super Mario Bros, NeuroRacer, Call of Duty*). Leurs environnements, à la fois dynamiques et imprévisibles, sollicitent fortement le traitement visuel périphérique (Green et al., 2010). Ce type de jeux propose des environnements très variables et des tâches difficiles, ainsi qu'une forte motivation et stimulation (Green & Bavelier, 2008). Par ailleurs, les jeux de stratégie en temps réel (généralement non moteurs) exigent une planification et une prise de décision rapide, tels que *Rise of Nations*. Quant aux jeux cérébraux (généralement non moteurs), ils visent à améliorer le fonctionnement cognitif global des joueurs en proposant des séries d'exercices inspirés de tests neuropsychologiques, incluant par exemple des tâches de mémorisation, d'arithmétique ou de lecture. Ils ont été spécifiquement conçus pour stimuler les fonctions cognitives, comme *Brain Age*, *Professeur Kawashima* ou *Lumosity*. Enfin, les jeux dits casual (généralement non moteurs), de puzzle et de réflexion comme *Tetris* ou *Pacman*, mobilisent des capacités de résolution de problème et de logique.

JEU VIDÉO NON MOTEUR	JEU VIDÉO MOTEUR	
Motricité non déterminante	Motricité déterminante pour le gain de la partie	
Pas de pression temporelle	Pression temporelle	
Dépense énergétique négligeable	Dépense énergétique faible	Dépense énergétique modérée
Pas de pertinence motrice	Motricité fine	Motricité globale
Utilisation des membres supérieurs seuls		Membres supérieurs et inférieurs
Position assise		Position debout
JEU VIDÉO SÉDENTAIRE		**JEU VIDÉO ACTIF**

Figure 5. Classification des jeux vidéo
(Besombes & Maillot, 2018)

3.2.2. Effets cognitifs des entraînements via les jeux vidéo

L'intérêt de la littérature scientifique pour les effets cognitifs des JV auprès des personnes âgées s'est amplifié, comme en témoignent deux récentes méta-analyses. Toril et al. (2014) intègrent 20 études basées sur les JV sédentaires et rapportent des améliorations cognitives significatives dans plusieurs domaines, notamment le temps de réaction, l'attention, la mémoire et la cognition globale, mais pas sur les fonctions exécutives. Quant à Mansor et al. (2020), ils incluent 27 articles intégrant tout type de JV (sédentaires et exergames). Ils montrent un effet faible des JV sur la mise à jour de la mémoire de travail, sans bénéfice sur les autres domaines cognitifs, à savoir la flexibilité, l'inhibition, la vitesse de traitement, l'attention, la mémoire différée et le raisonnement. Dans ces deux méta-analyses, les auteurs questionnent également les modalités des jeux comme modérateurs des effets cognitifs. Toril et al. (2014) s'intéressent aussi bien au type de jeu, en comparant les jeux cérébraux (e.g., *Nintendo Brain Training, Brain Age, Big Brain Academy*) aux autres jeux vidéo sédentaires (e.g., *Mario Kart, Pac Man, Donkey Kong, NeuroRacer*), qu'à la complexité des processus cognitifs que les jeux sollicitent, en comparant les jeux dits « simples » à des jeux dits « complexes ». Les auteurs ne trouvent pas d'effet modérateur de ces deux modalités. Mansor et al. (2020) comparent, quant à eux, les exergames aux JV sédentaires et montrent que le type de jeux est un facteur modérateur des effets cognitifs, en particulier sur le raisonnement et l'attention. Plus spécifiquement, leurs analyses indiquent que les exergames tendent à favoriser l'amélioration du raisonnement (p = 0,06), tandis que les JV sédentaires sont associés à des effets plus faibles, voire négatifs, sur l'attention. Par ailleurs, dans ces deux cas, les auteurs ne

distinguent pas les quatre types de jeux vidéo sédentaires (i.e., action, stratégie, cérébraux, casual) qui semblent pourtant, au moins théoriquement, générer des effets distincts.

Le choix du jeu pourrait effectivement influencer les effets cognitifs des entraînements. Concernant l'efficacité des jeux dits « casual », elle a été démontrée dans certaines études (e.g., Clark et al., 1987), mais ces jeux sont souvent utilisés comme groupe contrôle dans les travaux récents en raison de leurs bénéfices cognitifs théoriquement limités comparés à d'autres types de jeux (Belchior et al., 2013 ; Nouchi et al., 2012). Quant aux jeux cérébraux, ils semblent montrer peu de bénéfices, et leurs effets se limiteraient à des tâches cognitives similaires aux capacités entraînées pendant le jeu. L'étude d'Ackerman et al. (2010) évaluant les effets de transfert d'un entraînement de 20 séances d'une heure avec *Big Brain Academy* sur un mois n'a montré aucune amélioration significative sur les mesures de capacités cognitives et de vitesse de traitement. De manière similaire, l'étude de Ballesteros et al. (2014) qui examine les effets de 20 séances d'une heure avec des jeux issus de *Lumosity* montre des améliorations significatives en vitesse de traitement et en attention, mais aucun effet sur la mémoire de travail visuospatiale ni sur le contrôle exécutif. Bien que quelques études aient tout de même présenté des effets sur les fonctions exécutives de ce type de jeux (e.g., Nouchi et al., 2012), les jeux cérébraux semblent essentiellement montrer des transferts proches et une absence ou une très faible efficacité sur les capacités non ciblées par l'entraînement (e.g., Owen et al., 2010 ; Perrot et al., 2019). À l'opposé, les JV d'action, qui sollicitent des processus plus complexes, pourraient entraîner des transferts plus éloignés. Une méta-analyse a indiqué que leur efficacité dans l'amélioration des fonctions cognitives était médiée par l'âge (jeunes adultes vs personnes âgées), mais les âgés montraient tout de même des bénéfices sur la cognition globale, la vitesse de traitement et les fonctions exécutives (P. Wang et al., 2016).

L'étude de Perrot et al. (2019) a comparé les effets de différents jeux. Trente-six personnes âgées de 60 à 71 ans ont été réparties en trois groupes : deux groupes actifs, qui jouaient soit à un JV d'action (*Super Mario Bros),* soit à un JV cérébral (*Kawashima Brain Training*), et un groupe contrôle inactif. Les groupes actifs ont suivi un entraînement de 3 séances d'1 h par semaine pendant 8 semaines. Ils ont montré des évolutions différentes : les participants du groupe JV d'action ont progressé dans cinq des sept tests, et ont montré une amélioration du raisonnement, de la vitesse de traitement, de la mémoire visuospatiale, des fonctions visuospatiales, et de la mémoire de travail. Ceux du groupe JV cérébral ont, quant à eux, progressé sur deux tests évaluant le raisonnement et l'inhibition. Les auteurs ont indiqué que l'amélioration de l'inhibition par le JV cérébral semblait relever d'un transfert proche, cette fonction ayant été directement entraînée par le jeu et évaluée de manière semblable. En revanche, les transferts

engendrés par la pratique du programme *Super Mario Bros* semblaient être éloignés des tâches d'entraînement. En accord avec la théorie de Fissler et al. (2013), les auteurs expliquent ces résultats du groupe ayant joué à *Super Mario Bros* par un environnement riche et stimulant, hautement variable, sollicitant une forte flexibilité parmi un large panel de différentes tâches (Green & Bavelier, 2008). Les JV d'action peuvent être complexes et solliciter de nombreux processus en parallèle. Dans le jeu *Super Mario Bros*, les joueurs sont confrontés simultanément à des défis en termes de rapidité, de précision, de raisonnement et de stratégie. Green et Bavelier (2008) suggèrent que plus un programme fait appel à une variété de combinaisons de processus, plus le transfert observé vers les fonctions cognitives est important. À l'inverse, l'entraînement par le JV cérébral (entraînement cognitif ciblé sur un processus), proposant majoritairement un environnement mono-tâche, engendrerait moins de variabilité et des transferts plus proches et spécifiques à une fonction cognitive.

Ainsi, les JV d'action, et plus largement ceux basés sur la nouveauté et la complexité, semblent offrir des perspectives intéressantes en matière de transfert cognitif éloigné. Toutefois, leur nature sédentaire et inactive physiquement (Ballesteros et al., 2018) soulève une limite importante, notamment face au besoin de maintenir une activité physique chez les personnes âgées. Cette constatation renforce l'intérêt croissant pour les approches combinées qui sont abordées dans le chapitre suivant.

Synthèse du chapitre 3

Ce chapitre a exploré les effets des entraînements physique, moteur et cognitif sur le vieillissement, en mettant en lumière leurs spécificités, leurs complémentarités et les mécanismes sous-jacents. Après avoir présenté les principales approches méthodologiques, il a été souligné que les études interventionnelles sont la voie la plus pertinente pour établir des liens de causalité et évaluer les effets de transfert et de rétention, essentiels dans une perspective de prévention du déclin lié à l'âge.

Dans l'ensemble, les entraînements physique, moteur et cognitif démontrent un potentiel indéniable pour soutenir les domaines corporel et cognitif. Ces résultats soulignent l'intérêt de développer des approches combinées, susceptibles de tirer parti des bénéfices propres à chaque modalité, afin d'optimiser la prévention et le ralentissement du vieillissement.

CHAPITRE 4 - LES APPROCHES D'ENTRAÎNEMENT COMBINÉ PHYSIQUE ET COGNITIF

Dans un contexte de recherche de programmes d'intervention optimaux afin de préserver, voire améliorer les capacités physiques, motrices, cognitives et de DT des personnes âgées, l'entraînement combiné, associant stimulations physique et/ou motrice et cognitive suscite un intérêt croissant (e.g., Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Rieker et al., 2022 ; Wollesen et al., 2020 ; Zhu et al., 2016). Cette approche s'inscrit dans une logique de synergie entre l'activité physique et l'entraînement cognitif, dont les bénéfices isolés ont déjà été présentés dans le chapitre précédent. Toutefois, les mécanismes sous-jacents, les modalités concrètes de mise en œuvre et les effets attendus de ces interventions combinées nécessitent encore d'être précisés. Pour en saisir pleinement le potentiel, il est essentiel de définir les différents types d'entraînement combiné, les formes de stimulation impliquées et les environnements dans lesquels ils s'inscrivent. Une revue narrative a été conduite et publiée à ce sujet. Elle figure en Annexe 1.

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2025). **Repenser l'activité physique pour un vieillissement cognitif actif grâce aux exergames : une approche novatrice.** *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement*, 23(2). Doi : 10.1684/pnv.2025.1230

Ce chapitre vise à apporter un cadre théorique et méthodologique aux interventions combinées. Il s'organise en quatre parties. La première partie définit ce que recouvre l'entraînement combiné, en identifiant ses formats et les effets théoriques attendus. La deuxième partie s'intéresse aux effets de ces entraînements sur les fonctions cognitives, physiques, motrices et les capacités de DT. La troisième partie interroge la nature même des combinaisons : faut-il privilégier une approche simultanée ou séquentielle ? Une intégration cognitive incorporée ou additionnelle ? Les arguments théoriques et les données empiriques disponibles sont confrontés. Enfin, la quatrième partie se concentre sur les modalités spécifiques d'entraînement incorporé à travers trois cas : les Activités Motrices et Cognitives Complexes basées sur la coopération et l'opposition (AM2C), les exergames commerciaux, et une nouvelle génération d'Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I).

1. LES INTERVENTIONS COMBINÉES : THÉORIE ET MÉTHODOLOGIE

1.1. Définition de l'entraînement combiné : une diversité de formes

L'entraînement combiné est une approche qui peut prendre de multiples formes. Trois principales modalités permettent de classifier ces entraînements : i) la temporalité de réalisation des tâches (i.e., simultanée, séquentielle), ii) le type de stimulation (i.e., cognitivo-physique, cognitivo-motrice, multi-domaine), et iii) l'environnement dans lequel l'entraînement est effectué (i.e., naturel, virtuel) (voir Figure 6).

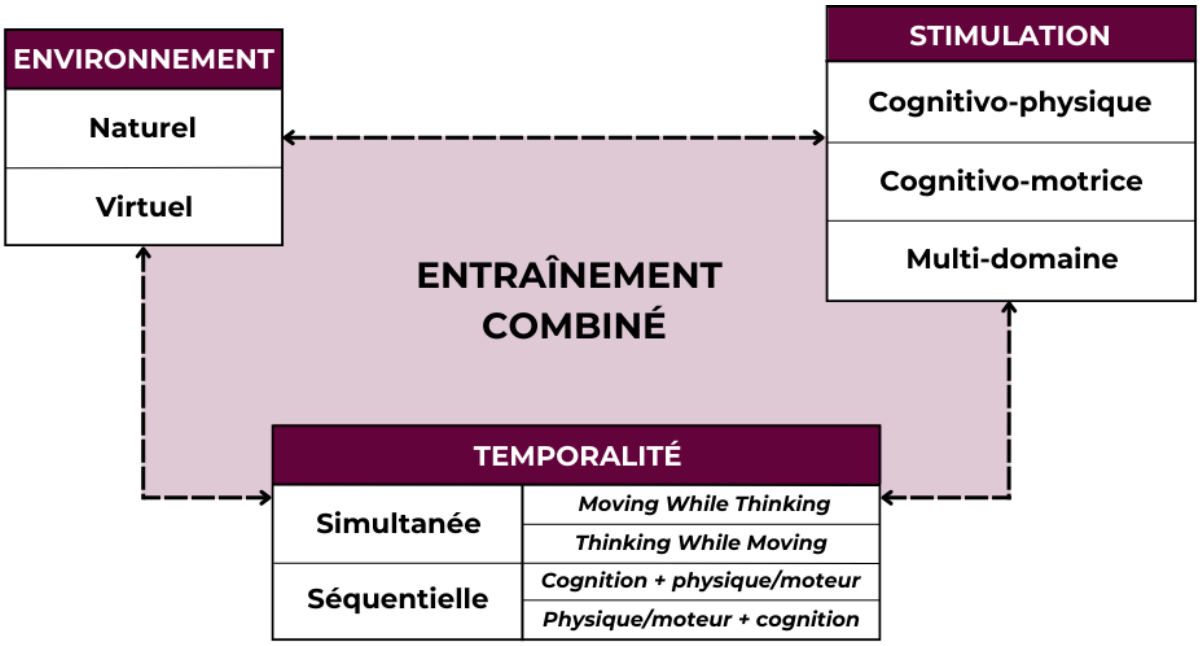


Figure 6. Les différentes caractéristiques potentielles de l'entraînement combiné
(Béraud-Peigné, Maillot et al., 2025)

1.1.1. La temporalité

Les exercices de l'entraînement combiné peuvent être classés selon leur ordre de réalisation dans le temps, un paramètre clé dans l'efficacité des interventions (Fissler et al., 2013). L'entraînement combiné peut être mis en œuvre de manière séquentielle (i.e., les tâches cognitive et physique et/ou motrice sont réalisées l'une après l'autre) ou simultanée (i.e., les tâches sont réalisées en même temps) (voir Figure 6 et Figure 7).

1.1.1.1. Entraînement combiné séquentiel

Les stimulations physique et/ou motrice et cognitive de l'entraînement combiné séquentiel sont effectuées à des moments distincts, soit le même jour à des heures différentes, soit à des jours séparés. Les entraînements peuvent être très variés et prendre la forme des activités physiques décrites dans la partie 2.2 du chapitre 3 et des activités cognitives, spécifiquement les jeux vidéo, détaillées dans la partie 3.2 du chapitre 3. L'approche la plus courante de l'entraînement combiné séquentiel est la combinaison de plusieurs stimulations physiques (i.e., aérobie, résistance, force, équilibre) et la réalisation de tâches cognitives informatisées (e.g., Desjardins-Crépeau et al., 2016 ; Sipilä et al., 2021 ; voir Teraz et al., 2022 pour une revue détaillée).

1.1.1.2. Entraînement combiné simultané

Contrairement à l'entraînement combiné séquentiel, les tâches motrice et/ou physique et cognitive de l'entraînement combiné simultané sont réalisées en même temps (Lauenroth et al., 2016). Selon le modèle d'Herold et al. (2018), l'entraînement simultané peut être subdivisé en deux catégories, selon la manière dont la tâche cognitive est intégrée à la tâche physique/motrice[1] : i) tâche cognitive additionnelle à la tâche motrice – *Thinking While Moving* (Penser en Bougeant), ii) tâche cognitive incorporée à la tâche motrice – *Moving While Thinking* (Bouger en Pensant) (voir Figure 6 et Figure 7).

***Thinking While Moving* – additionnel**. L'entraînement *Thinking While Moving* peut être défini comme un entraînement en DT, où les tâches motrices et cognitives sont dissociées. Ainsi, la réalisation de l'une des tâches (e.g., marcher) n'est pas nécessaire à l'exécution correcte de l'autre tâche (e.g., résoudre un calcul mental). La majorité des programmes (e.g., Eggenberger et al., 2015 ; Falbo et al., 2016 ; Hiyamizu et al., 2012 ; Nishiguchi et al., 2015 ; Norouzi et al., 2019 ; Pellegrini-Laplagne et al., 2022 ; Raichlen et al., 2020 ; Theill et al., 2013) utilisent une tâche d'équilibre, de marche ou de vélo, combinée à diverses tâches cognitives (e.g., fluence verbale, mémorisation).

[1] En accord avec le modèle d'Herold et al. (2018), uniquement le terme « tâche motrice » (pour « *motor task* ») est utilisé par la suite, bien qu'il serait plus juste de préciser « tâche physique ou motrice ».

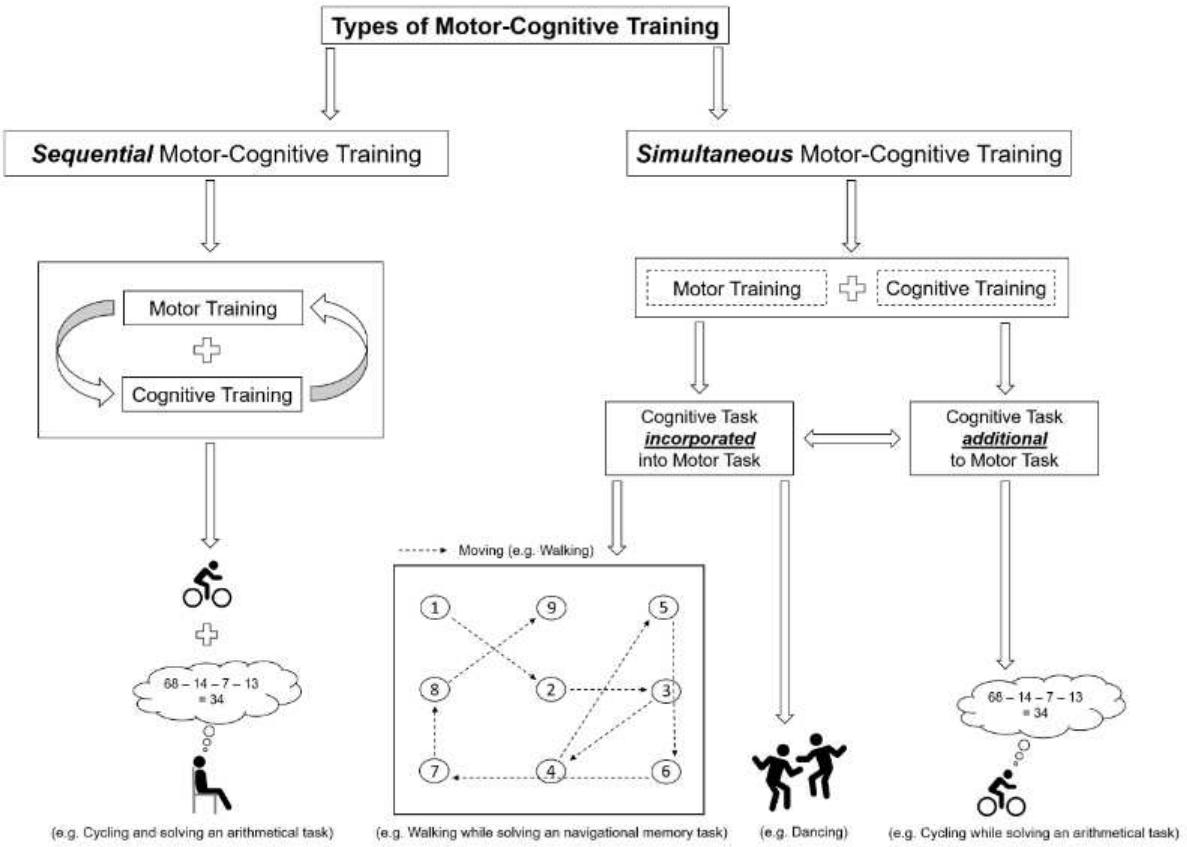


Figure 7. Différents types d'entraînements combinés selon le modèle d'Herold et al. (2018)

***Moving While Thinking* – incorporé.** Dans l'entraînement *Moving While Thinking*, la tâche cognitive est « intégrée » à la tâche motrice, ce qui signifie qu'elle est indispensable à la réussite de l'action cognitivo-motrice (e.g., marcher jusqu'à des plots dans un ordre défini, danser). Par définition, il ne s'agit ici donc pas de DT, puisque les deux composantes ne sont pas dissociables. De nombreuses activités, à des niveaux d'intensité et de complexité variables, sont considérées comme des entraînements *Moving While Thinking*. Il s'agit notamment d'exercices de déplacement à règles complexes (e.g., suivre des consignes motrices précises intégrant des éléments cognitifs tels que des séquences de couleurs, de directions ou d'itinéraires à mémoriser), de pratiques corporelles (e.g., Taï-chi, Qi Gong, danse), de sports de coopération ou d'opposition (e.g., sports collectifs, sports de combat, arts martiaux), ainsi que d'exergames. Ces derniers sont utilisés dans la majorité des études. Cela a notamment été mis en évidence dans la méta-analyse de Teraz et al. (2022) : lors de la classification des interventions, les auteurs ont constaté que, dans la catégorie des entraînements simultanés incorporés, la quasi-totalité des études reposait sur des exergames. En conséquence, ils ont choisi d'exclure celles qui n'en utilisaient pas, afin de constituer un groupe homogène. Cette méta-analyse est d'ailleurs la seule à comparer les

effets de l'entraînement incorporé à ceux de l'additionnel auprès de personnes âgées. Ses résultats sont détaillés dans la partie 3.2.2 du chapitre 4.

1.1.2. La nature des stimulations motrices et cognitives

L'entraînement simultané peut prendre diverses formes, soit cognitivo-moteur, soit cognitivo-physique, soit multi-domaine (physique, moteur, cognitif) (Torre & Temprado, 2022). L'entraînement cognitivo-physique correspond à l'association d'un entraînement d'endurance et/ou de résistance musculaire avec un entraînement cognitif. L'entraînement cognitivo-moteur fait référence à l'association d'un entraînement aux habiletés motrices complexes et d'un entraînement cognitif. Enfin, l'entraînement multi-domaine associe des exercices aérobies, des habiletés motrices complexes et des tâches cognitives. En théorie, compte tenu des effets spécifiques des différentes stimulations physiques et motrices (voir chapitre 3), les effets des entraînements cognitivo-physique, cognitivo-moteur et multi-domaine pourraient différer, tant sur le plan corporel que cognitif. Plus particulièrement, l'entraînement multi-domaine est supposé être plus efficace que les deux autres, en raison de la richesse et de la diversité des stimulations qu'il implique. Toutefois, cette hypothèse n'a pas encore été testée empiriquement : dans leur revue, Torre et Temprado (2022) ont identifié trois études portant sur les effets de l'entraînement simultané multi-domaine, dont deux le comparant à un groupe contrôle (Ansai et al., 2017 ; Nishiguchi et al., 2015) et une à un entraînement physique et moteur (Yokoyama et al., 2015).

1.1.3. L'environnement

Les environnements des programmes d'entraînement combiné peuvent être situés le long d'un continuum de virtualité (Figure 8), tel que proposé par Milgram et al. (1995). À une extrémité de ce continuum se trouvent les contextes totalement naturels, tels que les sports collectifs, la danse ou le Taï-chi. Dans ces cas, aucune médiation technologique n'est présente : les interactions se déroulent dans un espace physique naturel, sans modification de l'environnement. À la suite, se trouve la réalité augmentée, où le monde réel est enrichi en temps réel par des éléments virtuels (sons, images, données). L'utilisateur perçoit principalement l'environnement physique, avec des ajouts numériques superposés. Les jeux vidéo actifs sur console (e.g., *Nintendo Switch* ou *Xbox Kinect*), qui reposent sur une interface numérique tout en maintenant une interaction corporelle directe avec l'environnement naturel, peuvent se situer entre « l'environnement réel » et « la réalité augmentée ». En effet, ces dispositifs reposent sur une interaction physique réelle dans un espace non modifié, sans immersion ni transformation perceptive de l'environnement. L'interface numérique (écran de télévision ou console portable) guide l'action par

des signaux visuels et sonores, mais sans superposition directe d'éléments virtuels sur le monde réel, comme c'est le cas dans les systèmes de réalité augmentée au sens strict (par exemple via des lunettes transparentes type *HoloLens*). Ensuite, la virtualité augmentée représente un environnement principalement virtuel dans lequel sont intégrés des éléments du monde réel. Les exergames assistés par un mur immersif et interactif (décrits dans la partie 4.3. de ce chapitre) s'y inscrivent. L'environnement est majoritairement virtuel (projection des images sur un mur, environnement sonore et visuel généré artificiellement). Cependant, l'interaction corporelle réelle de l'utilisateur est conservée : la personne se déplace physiquement dans l'espace, sans casque. Des éléments réels (corps, ballon) sont intégrés dans l'environnement. À l'autre extrémité du continuum se situe la Réalité Virtuelle (VR) immersive, caractérisée par une immersion complète dans un environnement artificiel généré par ordinateur, généralement à l'aide d'un casque VR et de contrôleurs. Dans ce cas, la perception de l'environnement naturel est largement supprimée.

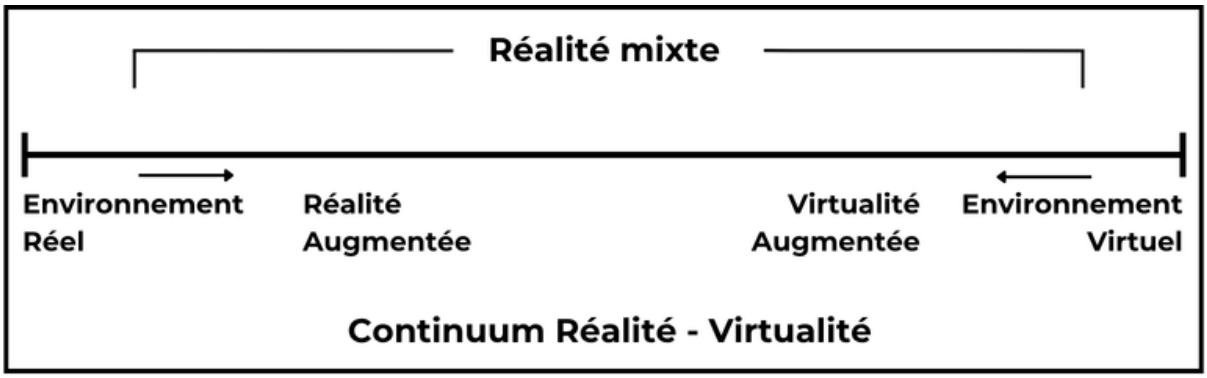


Figure 8. Continuum Réalité - Virtualité traduit depuis Milgram et al. (1995)

Les environnements virtuels offrent la possibilité de créer une grande variabilité de tâches et de situations, un atout essentiel pour stimuler les fonctions cognitives puisque cette richesse est considérée comme un facteur clé pour induire des effets positifs (Fissler et al., 2013). Les technologies virtuelles permettent ainsi de concevoir des entraînements adaptatifs, immersifs et engageants. Toutefois, ces modalités peuvent poser des problèmes d'accessibilité, notamment chez les personnes âgées, en raison de la complexité technologique, du coût du matériel ou d'un manque de familiarité avec les outils numériques. Des études préalables portant sur l'expérience utilisateur et le plaisir perçu apparaissent donc nécessaires. À l'inverse, les environnements naturels, sans médiation technologique, reposent sur des interactions directes avec le corps, l'espace physique et les objets du monde réel. Ils sont souvent plus accessibles, notamment pour les publics âgés. Cependant, ces environnements peuvent s'avérer moins riches ou moins modulables que les environnements virtuels.

La question du rôle de l'environnement peut être analysée à travers la revue systématique de Diamond et Ling (2020) portant sur 179 études évaluant les effets d'interventions (e.g., entraînements cognitifs informatisés et non informatisés, neurofeedback, programmes scolaires, activités physiques, pratiques de pleine conscience) sur les fonctions exécutives à tous les âges. Elle a montré que les pratiques de pleine conscience impliquant du mouvement (e.g., Taï-chi[1]), donc ancrées dans des environnements naturels, figurent parmi les plus efficaces pour améliorer les fonctions exécutives. En deuxième position, apparaissent les « programmes scolaires prometteurs » (e.g., Montessori, *Tools of the Mind*) suivis des entraînements cognitifs non informatisés. Toutes ces approches sont plus efficaces que l'entraînement informatisé, les auteurs supposant que les interactions en personne entre formateurs et participants jouent un rôle fondamental. Ainsi, bien que les résultats soient à considérer avec précaution étant donné que l'étude n'a pas été réalisée sur le public cible de cette thèse (i.e., étude effectuée sur une population allant des enfants aux personnes âgées), ils démontrent l'intérêt des pratiques naturelles par rapport à celles utilisant de nouvelles technologies. Malgré l'intérêt croissant des environnements virtuels, les modalités naturelles représentent tout de même une piste pertinente, en particulier pour les populations âgées. Ce questionnement mérite donc d'être approfondi dans les travaux futurs.

1.1.4. La dimension sociale

Les entraînements combinés peuvent être réalisés de manière individuelle ou collective. L'entraînement en groupe réalisé auprès de personnes âgées aurait des effets supérieurs à ceux observés dans des contextes individuels (Manser et al., 2024 ; Rieker et al., 2022). La méta-analyse de Rieker et al. (2022), décrite plus en détail dans la partie 2.2 de ce chapitre, indique que le groupe est un facteur modérateur des effets de l'entraînement combiné, aussi bien sur les capacités physiques que cognitives, reflétant selon les auteurs l'importance du lien social, notamment comme facteur de motivation dans les interventions auprès de ce public. Manser et al. (2024) confirment ces propos, à travers une méta-analyse s'intéressant, comme son titre l'indique, aux composants efficaces d'un entraînement par exergames (« *Components of effective exergame-based training* ») pour améliorer les capacités cognitives. Le groupe est également un facteur modérateur des effets sur l'attention complexe (mais non de la cognition globale et des fonctions exécutives).

[1] Le Taï-chi combine stimulations motrice et cognitive, bien que la charge cognitive soit plus faible que dans d'autres entraînements combinés (*e.g., exergames*). La stimulation cognitive émane d'enchaînements généralement complexes, avec un ordre précis à retenir ainsi qu'une attention soutenue à la posture, au rythme et à la respiration.

Bien que la dimension sociale de l'entraînement soit généralement appréhendée selon deux possibilités (i.e., individuelle, collective), celle-ci peut être représentée selon un continuum d'interactions, allant de l'absence totale de contact à une coopération et une opposition étroite entre les participants. À une extrémité de ce continuum se trouve l'entraînement individuel, réalisé sans interaction avec autrui. À un niveau intermédiaire, on retrouve des formes d'entraînement en groupe sans interaction directe, où les individus partagent un même espace (e.g., faire du vélo stationnaire dans une salle commune). À mesure que la coopération augmente, apparaissent des dyades ou petits groupes avec des interactions ponctuelles, comme dans les entraînements en binôme. Enfin, les situations d'entraînement collectif impliquant une coordination étroite entre les participants, telles que les jeux d'opposition ou les exercices de coopération, placent l'interaction sociale au cœur de la pratique. Les effets spécifiques de ce type d'entraînement sont documentés dans la partie 4.1 de ce chapitre.

1.2. Fondements théoriques et effets attendus de l'entraînement combiné

Les bénéfices des interventions isolées (e.g., activité physique seule, entraînement cognitif seul) sur les fonctions physiques et cognitives des personnes âgées ne sont plus à prouver (Erickson et al., 2011 ; Raz, 2000). Mais l'activité physique seule pourrait ne pas être optimale pour retarder le déclin cognitif lié au vieillissement, et l'entraînement cognitif peut présenter plusieurs limites, comme le manque de transfert éloigné et l'entraînement en situation sédentaire (voir Partie 3 du Chapitre 3). Dans une perspective de conception de l'intervention optimale, Erickson et al. (2015) insistent sur la nécessité de comprendre comment combiner au mieux l'entraînement cognitif à l'activité physique. Leur association peut avoir des effets synergiques et de ce fait, être plus efficiente pour améliorer les fonctions cognitives (Kraft, 2012). Effectivement, selon le modèle de la facilitation de la plasticité guidée (*guided plasticity facilitation*) (Fissler et al., 2013), les activités physiques et cognitives pourraient influencer la plasticité cérébrale par des voies distinctes mais complémentaires grâce aux : i) effets de « facilitation » de l'activité physique et ii) effets d'« orientation » des exercices cognitifs. L'activité physique induirait des changements neurophysiologiques [i.e., prolifération de cellules dans l'hippocampe (Fabel, 2009), une augmentation de la production de facteurs neurotrophiques, notamment du BDNF, augmentation de la plasticité synaptique, comme la potentialisation à long terme (van Praag et al., 1999)] qui pourraient faciliter la neuroplasticité (effet de « facilitation »). La stimulation cognitive, quant à elle, guiderait ce potentiel « plastique » (Fissler et al., 2013) en induisant des changements synaptiques et neuronaux (Herold et al., 2018 ; Stojan & Voelcker-Rehage, 2019) favorisant la survie de nouvelles cellules induites par l'exercice (Fabel, 2009) et la régulation des changements synaptiques (effet d'« orientation »).

L'entraînement combiné semble offrir un double avantage : des bénéfices cognitifs, potentiellement supérieurs à ceux d'un entraînement physique, moteur ou cognitif isolé, ainsi que des bénéfices physiques et moteurs, qu'un entraînement purement cognitif ne permettrait pas d'obtenir. De plus, l'entraînement combiné, lorsqu'il est simultané additionnel, sollicite directement les capacités de DT. Cependant, certaines limites théoriques peuvent également être soulevées concernant la pertinence de ce type d'intervention pour des publics âgés. L'ajout d'une tâche cognitive pendant l'activité physique pourrait agir comme un distracteur, compromettant la qualité de l'un des entraînements. De plus, plusieurs auteurs indiquent que l'entraînement combiné pourrait créer une fatigue cognitive et du stress excessif, pouvant interférer avec les gains de l'intervention (Holtzer et al., 2010 ; Lampit et al., 2014). Ainsi, il apparaît essentiel de comparer l'entraînement combiné à ses composantes isolées, tant en termes d'effets cognitifs, physiques, moteurs que de performances en situation de DT.

2. IMPACT DE L'ENTRAÎNEMENT COMBINÉ SUR LES FONCTIONS PHYSIQUES, COGNITIVES ET DOUBLE-TACHE

En raison des effets positifs attendus auprès des personnes âgées, un nombre croissant d'études interventionnelles, et, par conséquent, de méta-analyses récentes, s'est intéressé à l'impact des programmes combinés sur les fonctions cognitives (e.g., Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Rieker et al., 2022 ; Wollesen et al., 2020 ; Zhu et al., 2016), physiques et motrices (Gavelin et al., 2021 ; Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022) ainsi que de DT (Gavelin et al., 2021 ; Teraz et al., 2022 ; Wollesen et al., 2020). Plusieurs de ces travaux ont également comparé les effets de l'entraînement combiné à ceux des entraînements physique/moteur[1] et cognitif réalisés isolément (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Zhu et al., 2016). Dans cette deuxième partie du chapitre 4, les effets de l'entraînement combiné sont présentés sans distinction de temporalité (i.e., sans différencier les modalités séquentielles ou simultanées, incorporées ou additionnelles). Les études portant exclusivement sur une activité, par exemple les exergames (e.g., Stanmore et al., 2017), ne sont donc pas incluses à ce stade. Ensuite, les effets spécifiques de l'entraînement simultané sont comparés à ceux de l'entraînement séquentiel, et ceux de l'entraînement incorporé à l'additionnel (partie 3). Enfin, les effets propres aux différentes formes d'entraînement simultané incorporé (e.g., exergames, sports collectifs) sont examinés (partie 4). Compte tenu du nombre élevé d'études menées sur le sujet, cette section s'appuie principalement sur les résultats de méta-analyses.

[1] En accord avec les termes utilisés dans la littérature et par souci de concision, pour chaque méta-analyse présentée dans ce chapitre incluant une comparaison à un entraînement physique et/ou moteur, le terme « entraînement physique » est utilisé et les modalités recouvertes par ce terme sont précisées (e.g., aérobie, coordination, équilibre).

2.1. Effets de l'entraînement combiné sur les fonctions cognitives

La première méta-analyse consacrée à l'évaluation des effets cognitifs de l'entraînement combiné auprès de personnes âgées en bonne santé a été réalisée par Zhu et al. (2016) à partir de 20 Essais Contrôlés Randomisés (ECR). Elle montre que l'entraînement combiné (i.e., tout type d'entraînement), allant de 6 à 96 semaines (médiane = 12 semaines) est supérieur à une condition témoin (i.e., n = 9, passive ; n = 6, active : conférences, vidéos, éducation à la santé, lecture, activités de loisirs) sur le score global de cognition, bien que l'effet observé reste de faible ampleur (Différence de Moyenne Standardisée (DMS) = 0,29 ; p < 0,01). Ce score représente six domaines cognitifs spécifiques : mémoire, fonctions exécutives, attention, capacités visuospatiales, cognition générale, vitesse de traitement. L'analyse révèle également un effet significatif sur l'ensemble de ces domaines, excepté la vitesse de traitement. Comparé à l'entraînement physique (i.e., aérobie, renforcement musculaire, équilibre, coordination, souplesse et/ou combinaison de plusieurs de ces modalités), l'entraînement combiné présente un avantage modeste mais significatif sur le score global de cognition (DMS = 0,22, p < 0,01). Uniquement deux domaines montrent des différences significatives (i.e., cognition générale, vitesse de traitement, basés respectivement sur seulement une et deux études). En revanche, la méta-analyse ne démontre pas de supériorité par rapport à l'entraînement cognitif seul (i.e., entraînement cognitif multi-domaine, mémorisation). Cette méta-analyse s'est également intéressée aux effets de rétention, présentés dans la partie 2.4 du chapitre 4. Des résultats similaires sont rapportés par Gavelin et al. (2021) dans une méta-analyse regroupant 47 ECR menés auprès de participants majoritairement en bonne santé ou présentant des troubles cognitifs légers (score MMSE compris entre 23 et 29/30), âgés en moyenne de 65 à 87 ans. Cette étude met en évidence des effets significatifs de l'entraînement combiné (i.e., tout type d'entraînement), de 4 à 40 semaines (médiane = 12 semaines) sur le score global de cognition, avec une taille d'effet faible (g = 0,22), mais avec des résultats très hétérogènes entre les études. Dans cette méta-analyse, le score global de cognition comprend 7 domaines (i.e., fonctions exécutives, mémoire à court terme et de travail, stockage à long terme et récupération, vitesse de traitement, traitement visuel, raisonnement fluide). Au niveau de ces domaines, uniquement le traitement visuel ne montre pas d'amélioration significative. Elle confirme l'avantage de l'entraînement combiné (hors exergames) par rapport à l'entraînement physique (toute forme d'activité physique structurée, telle que l'entraînement aérobie, en renforcement musculaire, à la marche ou à l'équilibre), tout en ne montrant, là encore, aucune supériorité par rapport à l'entraînement cognitif isolé [entraînement basé sur les processus, défini comme la pratique répétée de tâches ciblant un ou plusieurs

domaines cognitifs (voir partie 3.1.1 du chapitre 3) sur le score global de cognition[1]. Cette méta-analyse s'est également intéressée aux effets physiques (présentés dans la partie 2.2 de ce chapitre) et à la différence d'effets entre l'entraînement simultané, séquentiel et en exergames (présentés dans la partie 4.2.2 de ce chapitre). Les travaux de Gheysen (2018) et Rieker (2022) et leurs collaborateurs soutiennent ces conclusions, tandis que ceux de Guo et al. (2020), portant sur 21 ECR, ne relèvent pas de différence significative entre l'entraînement physique seul et l'entraînement combiné sur les capacités cognitives, ici évaluées via les fonctions exécutives.

Les résultats des méta-analyses convergent vers un bénéfice cognitif global, mais faible, de l'entraînement combiné (de tout type) (Gavelin et al., 2021 ; Wollesen et al., 2020 ; Yen & Chiu, 2021 ; Zhu et al., 2016), notamment sur les fonctions exécutives (Guo et al., 2020). Cependant, aucun avantage clair n'émerge lorsqu'il est comparé à l'entraînement cognitif seul (Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Zhu et al., 2016). En ce qui concerne la comparaison avec l'entraînement physique seul, les résultats demeurent contrastés : certaines méta-analyses indiquent un léger avantage de l'entraînement combiné (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Zhu et al., 2016), tandis que d'autres ne rapportent aucune différence (Guo et al., 2020). Selon Torre et Temprado (2022), ces divergences pourraient s'expliquer par l'hétérogénéité des programmes étudiées. Ils insistent sur l'importance de distinguer les différentes formes de stimulations physique et motrice (i.e., motrice seule, physique seule, combinée simultanée ou séquentielle), qui pourraient produire des effets différenciés sur les capacités cognitives. Par ailleurs, les modalités des tâches cognitives méritent également une attention particulière. À ce titre, certaines formes de stimulation virtuelles, comme les jeux vidéo, semblent plus efficaces que les entraînements cognitifs traditionnels (Green & Bavelier, 2008).

2.2. Effets de l'entraînement combiné sur les fonctions physiques et motrices

L'évaluation des effets physiques de l'entraînement combiné est moins systématique que celle des effets cognitifs. Pourtant, cette analyse est essentielle puisque les tâches combinées, en particulier lorsqu'elles sont réalisées simultanément, peuvent induire des interférences. Il est ainsi plausible qu'un entraînement combiné soit moins efficace qu'un entraînement physique seul pour améliorer les capacités physiques et motrices des personnes âgées.

[1] L'analyse n'a pas été réalisée sur les sous-domaines.

Trois méta-analyses récentes se sont spécifiquement intéressées aux effets physiques et moteurs de l'entraînement combiné chez les personnes âgées en bonne santé (Gavelin et al., 2021 ; Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022). La méta-analyse de Teraz et al. (2022) s'appuie sur un large panel d'ECR (n = 91, entre 65 et 87 ans), comparant les effets de l'entraînement combiné à ceux de l'entraînement physique (de tout type) et à un groupe contrôle passif. Les résultats indiquent une amélioration faible de la vitesse de marche (g = 0,34, p = 0,003), comparable à celle obtenue par l'entraînement physique seul. L'équilibre dynamique, mesuré via le test TUG, montre également une amélioration significative (g = 0,42, p < 0,001), avec un effet cette fois supérieur à celui de l'entraînement physique. Cette étude a également évalué les effets sur les capacités de DT cognitivo-motrice (résultats présentés dans la partie 2.3 de ce chapitre) et s'est intéressée aux différences d'effets entre les entraînements additionnel, incorporé et séquentiel, présentés dans la partie 3.2.2 de ce chapitre. La méta-analyse de Rieker et al. (2022), basée sur 50 études, adopte une méthodologie similaire[1], tout en incluant un quatrième groupe : l'entraînement cognitif seul (tout type). Elle révèle que l'entraînement combiné améliore l'équilibre (g = 0,273, p < 0,001), la condition physique (g = 0,24, p < 0,01) et la force musculaire (g = 0,37, p < 0,01). Un avantage significatif est observé par rapport à l'entraînement physique pour l'équilibre (g = 0,229, p < 0,05) et par rapport à l'entraînement cognitif pour la condition physique (g = 0,338, p < 0,01). Les résultats de cette étude sur la rétention sont présentés dans la partie 2.4 de ce chapitre. Enfin, la méta-analyse de Gavelin et al. (2021), précédemment présentée en détail dans la section consacrée aux effets cognitifs, rapporte également un effet faible mais significatif de l'entraînement combiné sur le score global physique (g = 0,25, p non renseigné), regroupant la mobilité fonctionnelle, la force, les capacités aérobies, l'équilibre, la marche et la performance physique en DT. En revanche, parmi les sous-domaines évalués, seule la mobilité fonctionnelle[2] montre une amélioration significative. L'entraînement combiné (hors exergames) entraîne des améliorations du score global physique comparativement à l'entraînement cognitif, mais pas par rapport à l'entraînement physique.

Dans l'ensemble, ces méta-analyses suggèrent que l'entraînement combiné a un effet modeste mais positif sur différentes dimensions des capacités physiques. Il se révèle généralement plus efficace que l'entraînement cognitif (Gavelin et al., 2021 ; Rieker et al., 2022), et équivalent voire légèrement

[1] Elle compare l'entraînement combiné (de tout type), l'entraînement physique seul (tout type) et un groupe contrôle (passif et actif – activités de loisirs, éducation à la santé).

[2] Terme traduit de l'anglais « *functional mobility* ». Voici les tests utilisés dans les études incluses dans la méta-analyse pour évaluer cette capacité : marche sur 4 m ou 10 m, 5 levers de chaise, *8-Foot up and go*, gratte-dos, *sit-and-reach test*, 30 secondes assis-debout, *Functional reach test*, TUG, *Senior fitness test*, *Short physical performance battery*.

supérieur à l'entraînement physique (Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022) selon les capacités évaluées. Ces données soutiennent l'intérêt de recourir à l'entraînement combiné pour stimuler les capacités physiques et motrices chez les personnes âgées. Bien que les effets observés restent modestes, l'ajout d'une composante cognitive ne semble pas nuire à l'efficacité physique de l'entraînement.

2.3. Effets de l'entraînement combiné sur les capacités de double-tâche

Les études portant sur les effets de l'entraînement combiné sur les capacités de DT sont nettement moins nombreuses que celles évaluant les capacités physiques, motrices et cognitives. Parmi les sept méta-analyses présentées dans les sections 2.1 et 2.2 de ce chapitre, seules trois (Gavelin et al., 2021 ; Teraz et al., 2022 ; Wollesen et al., 2020) incluent des mesures en contexte de DT (uniquement DT cognitivo-motrices) et chacune ne considère qu'un seul indicateur.

Gavelin et al. (2021) rapportent que l'entraînement combiné n'a pas d'effet significatif sur la performance motrice dans une DT cognitivo-motrice. De manière similaire, Teraz et al. (2022) ne relèvent aucun effet significatif sur la vitesse de marche en situation de DT. En revanche, ces deux études n'évaluent pas la performance cognitive en DT. Les auteurs attribuent ces résultats à plusieurs facteurs : un nombre limité d'études ciblant spécifiquement la DT (20 sur 91), une qualité méthodologique globalement faible des ECR, ainsi qu'une grande hétérogénéité des tâches cognitives utilisées (e.g., N-back, fluence verbale, décompte, Go/No-Go). Enfin, la méta-analyse de Wollesen et al. (2020) compare l'entraînement combiné (uniquement en DT, les auteurs considérant que les exergames sont une DT) à une condition contrôle (actif : activité physique ; inactif). Les auteurs concluent que l'entraînement combiné pourrait avoir un effet bénéfique sur la réduction du coût en DT, bien qu'aucune analyse statistique n'ait pu être réalisée sur cette variable en raison du faible nombre d'études concernées (seulement 3 sur 25, Ansai et al., 2017 ; Maclean et al., 2014 ; Wollesen et al., 2017).

L'*overview* de Gallou-Guyot et al. (2020) regroupant revues systématiques et méta-analyses, complète ces constats en rapportant des résultats encourageants. Elle recense trois travaux : deux revues systématiques (Agmon et al., 2014 ; Wollesen & Voelcker-Rehage, 2014) et une méta-analyse (Plummer et al., 2015), qui mettent en évidence des effets bénéfiques de l'entraînement combiné sur le contrôle postural (Agmon et al., 2014), sur la mobilité et la marche en condition de DT (Plummer et al., 2015), ainsi que sur la performance en position debout et de marche en situation de DT (Wollesen & Voelcker-Rehage, 2014). Il convient néanmoins de souligner que les travaux de Plummer et al. (2015) et de Wollesen et Voelcker-Rehage (2014) ne portent pas exclusivement sur l'entraînement combiné, incluant également des études sur l'entraînement physique. Dans la majorité des cas, seule la performance

physique en condition de DT était évaluée, sans prise en compte systématique de la performance en ST, ou des performances cognitives en ST et DT, ni du DTE.

À l'échelle des ECR, l'étude de Bherer et al. (2020) éclaire les effets d'un entraînement combiné (2 séances d'activité physique et 1 séance d'entraînement cognitif d'1 h par semaine pendant 12 semaines) sur la DT cognitivo-cognitive, comparativement aux entraînements physique et cognitif pris isolément. Quatre groupes (n = 87) avec des contrôles actifs dans chaque domaine étaient comparés : COG+/AER+ (DT cognitivo-cognitive + aérobie et renforcement), COG−/AER+ (leçons d'informatique + aérobie et renforcement), COG+/AER− (DT cognitivo-cognitive + étirements et tonification) et COG−/AER− (leçons d'informatique + étirements et tonification). L'évaluation était centrée sur une tâche en DT cognitivo-cognitive[1], permettant d'estimer i) le coût de double-tâche (DTC) et ii) le *task-set cost*[2]. Les analyses montrent que AER+ n'est associé à aucune amélioration de ces deux indices, tandis que COG+ prédit une réduction du DTC. Plus particulièrement, la combinaison COG+/AER+ prédit une réduction du *task-set cost*, au-delà de chacune des composantes prises isolément, suggérant un effet synergique spécifique, alors que la réduction du DTC semble portée par l'entraînement cognitif.

2.4. L'évaluation des effets de rétention

L'évaluation des effets de rétention est de plus en plus recommandée pour juger de l'efficacité des programmes d'intervention chez les personnes âgées (e.g., Ballesteros et al., 2018). Elle permet d'estimer dans quelle mesure les effets induits par l'entraînement se maintiennent, ce qui ne peut être mis en évidence que par le biais d'un suivi. Ce maintien est particulièrement crucial dans la prévention du vieillissement puisque, comme le suggère le modèle d'Hertzog et al. (2009) des trajectoires développementales du vieillissement cognitif (détaillé précédemment dans la partie 2.3.2 du chapitre 1), l'enrichissement des capacités cognitives, même à un âge avancé, est susceptible de retarder l'entrée dans la dépendance.

Les effets de rétention restent peu explorés dans les études interventionnelles, et notamment dans celles intégrant un entraînement combiné. En effet, parmi les méta-analyses mentionnées en sections 2.1 et 2.2, seules deux (Rieker et al., 2022 ; Zhu et al., 2016) sur huit évaluent ces effets. La méta-

[1] Les auteurs précisent que la tâche d'évaluation est considérée comme proche (au niveau de la modalité) de « l'entraînement cognitif actif » étant donné que la modalité de réponse (manuelle) au test est identique à celle de l'entraînement. Cependant, les stimuli diffèrent.

[2] Selon les auteurs, le *task-set cost* fait référence à la capacité à maintenir en mémoire différentes alternatives de réponse et à se préparer à plusieurs tâches. Il ne représente donc pas une mesure directe de la DT, à la différence du DTC.

analyse de Zhu et al. (2016) ne comprend que 3 études sur 20 intégrant l'évaluation de la rétention dans leur protocole (Linde & Alfermann, 2014 ; Oswald et al., 2006 ; Rahe et al., 2015). Les résultats montrent un effet modéré de l'entraînement combiné sur la rétention (de 3 mois à 5 ans) lorsqu'il est comparé à un groupe contrôle (DMS = 0,61, $p < 0,01$). En revanche, ces effets ne sont pas significatifs lorsque la comparaison est faite avec un entraînement cognitif seul (DMS = 0,38, $p = 0,06$) ou un entraînement physique (DMS = 0,69, $p = 0,06$), bien que les valeurs s'approchent du seuil de significativité.

L'étude de Linde et Alfermann (2014) a évalué les effets de rétention trois mois après la fin d'un programme combiné (forme séquentielle des modalités physique et cognitive) de quatre mois (2 séances de 60 à 90 minutes par semaine), mené auprès de personnes âgées en bonne santé (âge moyen = 67 ans), en comparaison avec trois groupes : un groupe d'entraînement physique (aérobie, renforcement musculaire), un groupe d'entraînement cognitif, et un groupe contrôle. Les auteurs rapportent des effets positifs sur la vitesse cognitive (mesurée via un test de substitution chiffre-symbole), immédiatement après l'entraînement uniquement pour le programme combiné, mais trois mois après l'intervention pour les entraînements combiné et cognitif. Concernant la concentration[1], les entraînements physique, cognitif et combiné ont amélioré cette capacité juste après l'intervention et seul l'entraînement physique a permis de maintenir cette amélioration trois mois plus tard.

L'étude d'Oswald et al. (2006) a été réalisée auprès de 375 sujets (179 au suivi après 5 ans) âgés de 75 à 93 ans. L'étude compare les effets de 30 sessions d'un entraînement combiné, réparties sur un an, à ceux de diverses modalités (i.e., entraînement physique, cognitif, groupe contrôle et autres formes de stimulation ; uniquement les résultats des trois premiers groupes et de l'entraînement physique et cognitif combiné sont présentés ici) sur un score global de cognition (score z de plusieurs fonctions cognitives), ainsi que sur un score global physique, avec un suivi cinq ans plus tard. L'entraînement physique (45 minutes), ciblait l'équilibre, la coordination perceptivo-motrice et la flexibilité, tandis que l'entraînement cognitif (90 minutes) portait sur la vitesse de traitement, l'attention et la mémoire. L'entraînement combiné cumulait ces deux modalités. Au niveau cognitif, les résultats montrent des améliorations pour les groupes cognitif et combiné par rapport au groupe contrôle, sans effet pour le groupe entraînement physique, avec une taille d'effet plus élevée pour le groupe combiné que cognitif. Ces effets sont maintenus en rétention. Au niveau physique, les données sont manquantes pour le groupe entraînement cognitif puisque ces participants n'ont pas réalisé d'évaluation sur ce domaine. Après la phase d'entraînement, uniquement le groupe combiné s'est amélioré par rapport au groupe

[1] Terme utilisé par les auteurs.

contrôle, cependant, ces effets ne se maintiennent pas en rétention. L'une des principales limites de cette étude concerne les analyses qui ont toutes été réalisées entre les groupes actifs et le groupe contrôle, sans comparaison entre les groupes actifs (e.g., combiné vs cognitif). De son côté, l'étude de Rahe et al. (2015) met en évidence des effets de rétention différenciés selon les fonctions cognitives évaluées, un an après un programme de 6,5 semaines (deux séances de 90 minutes par semaine), comparant un entraînement combiné à un entraînement cognitif. L'attention divisée, qui s'améliorait de manière similaire entre les deux groupes après l'entraînement, n'est maintenue que pour le groupe combiné. À l'inverse, la mémoire verbale immédiate, qui s'améliorait dans les deux groupes, ne se maintient qu'au sein du groupe cognitif. Le niveau cognitif général, la mémoire verbale différée et la fluence verbale, qui ne s'amélioraient que dans le groupe combiné, montrent un maintien des effets. Concernant la fluence verbale, le groupe cognitif présente une amélioration à long terme sans amélioration immédiate. Par ailleurs, il est important de noter que ces trois études incluses dans la méta-analyse de Zhu et al. (2016) utilisent toutes un format d'entraînement séquentiel. Ces résultats ne sont donc pas transférables à l'entraînement simultané.

La seconde méta-analyse s'intéressant aux effets de rétention de l'entraînement combiné est celle de Rieker et al. (2022) décrite dans la partie 2.2 de ce chapitre. Elle est particulièrement intéressante puisqu'elle évalue aussi bien les capacités cognitives que physiques. Cependant, elle n'intègre que quatre études ayant réalisé des mesures de pré-tests et de rétention sur les capacités physiques, dont aucune comparant les entraînements combiné et cognitif. Étant donné le faible nombre de résultats, son analyse repose sur un score global physique (i.e., équilibre, force, condition physique) et non sur ses composantes séparées. Les résultats indiquent que l'entraînement combiné, comparativement au groupe contrôle, présente des effets entre les pré-tests et la rétention, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il est comparé à l'entraînement physique. Concernant le score global de cognition, les effets se maintiennent comparativement au groupe contrôle et à l'entraînement physique, ce qui n'est pas le cas en comparaison avec l'entraînement cognitif.

L'étude d'Eggenberger et al. (2015) apporte des renseignements concernant les effets de rétention de l'entraînement simultané et reflète l'importance d'un protocole rigoureux. Les auteurs comparent les effets de rétention de deux programmes simultanés (incorporé et additionnel) à ceux d'un entraînement physique (2 séances par semaine pendant 6 mois). Le protocole et ses résultats à court terme sont détaillés dans la partie 3.2.2 de ce chapitre. Les résultats indiquent un maintien des performances un an après l'intervention, de façon comparable entre les groupes simultanés et le groupe physique, en ce qui concerne la vitesse de traitement de l'information, la mémoire de travail et la

mémoire visuelle à long terme. Tous les groupes montrent également une amélioration différée (uniquement observée lors de l'évaluation de rétention) de la flexibilité cognitive. Toutefois, l'absence de groupe contrôle complexifie l'interprétation de ces effets : il est impossible de déterminer s'il s'agit d'un effet retardé réel ou simplement d'un effet d'apprentissage au test. De plus, les auteurs soulignent le fait de ne pas avoir évalué le niveau d'activité physique des participants, ce qui limite l'explication des effets observés à long terme.

Ainsi, peu d'études évaluent les effets de rétention, bien qu'ils constituent un enjeu important dans l'évaluation des bénéfices à long terme. La grande variabilité des durées d'intervention (de 6,5 semaines à 1 an) et des délais de suivi (de 3 mois à 5 ans) complexifie toute tentative de comparaison entre leurs résultats. De plus, certaines études, comme celle d'Oswald et al. (2006), comparent les effets d'un entraînement combiné à ceux de modalités uniques, mais en allouant une durée d'intervention plus longue au programme combiné, ce qui introduit un biais. D'autres études, comme celle d'Eggenberger et al. (2015), n'incluent pas de groupe contrôle et n'évaluent pas le mode de vie des participants. Il apparaît donc essentiel que les futures recherches prennent en compte ces limites dans la conception de leur protocole, afin de pouvoir expliquer les mécanismes impliqués dans le maintien (ou l'absence de maintien) des effets cognitifs et physiques.

3. ENTRAÎNEMENT COMBINÉ : APPROCHES UNIQUES OU PLURIELLES ?

L'entraînement combiné semble pouvoir procurer des bénéfices physiques, moteurs, cognitifs et sur les capacités de DT auprès des personnes âgées. Cependant, les résultats sur ces effets semblent diverger, notamment pour une raison principale : la nécessité de distinguer les différents types d'entraînement possibles. Comme décrit dans la partie 1.1.1 de ce chapitre, l'entraînement combiné peut être présenté sous différentes formes, soit séquentiellement, soit simultanément. Cette temporalité de combinaison pourrait avoir un impact important sur les effets de l'intervention.

3.1. Entraînement combiné simultané ou séquentiel : quelles différences ?

3.1.1. Arguments théoriques

Chez les personnes âgées, l'entraînement séquentiel présente deux avantages principaux par rapport à l'entraînement simultané. D'une part, il ne génère pas de coût de DT (i.e., diminution des performances motrices, cognitives, ou des deux) puisque les tâches sont réalisées séparément. D'autre part, les personnes âgées peuvent s'investir pleinement dans chacune des tâches sans que cela ne conduise à un effet de priorisation. Ainsi, les deux entraînements peuvent être réalisés efficacement, sans

générer d'interférence. En revanche, plusieurs incertitudes subsistent quant à la charge optimale nécessaire pour obtenir des gains cognitifs, notamment la fréquence, la durée et surtout l'ordre temporel entre la stimulation cognitive et physique (Lauenroth et al., 2016). À l'opposé, l'entraînement simultané apparaît pertinent pour trois raisons principales : i) la limitation temporelle des effets de facilitation de l'activité physique, ii) le potentiel accru de transfert d'apprentissage grâce à une situation combinée, et iii) le gain de temps qu'il offre par rapport à un entraînement séquentiel.

Premièrement, selon le modèle de facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013), les effets de l'entraînement combiné seraient sensibles à la temporalité. Réaliser les tâches cognitives et physiques à des moments trop éloignés pourrait réduire l'effet synergique (Bherer et al., 2020 ; Zhu et al., 2016). En effet, les effets d'interaction reposeraient sur une « fenêtre temporelle » relativement restreinte. Plusieurs études montrent que la production de BDNF périphérique augmente pendant l'exercice physique, reste élevée jusqu'à environ une heure après, puis chute en dessous des niveaux de base (pour revue, voir Knaepen et al., 2010). Ainsi, la « facilitation » des mécanismes de plasticité, notamment via le BDNF, serait maximale pendant ou immédiatement après l'activité physique. Toutefois, cette temporalité doit encore être précisée par des recherches supplémentaires (Fissler et al., 2013 ; Zhu et al., 2016).

Deuxièmement, l'entraînement simultané induit une situation cognitivement et physiquement engageante, qui favorise un meilleur transfert des apprentissages vers des tâches nouvelles ou plus écologiques chez les personnes âgées (Stojan & Voelcker-Rehage, 2019). Ce type de transfert est essentiel pour maintenir l'autonomie fonctionnelle au quotidien. De plus, il a été suggéré que l'entraînement simultané pourrait avoir des effets positifs sur le plaisir ressenti pendant l'entraînement, comparativement à l'entraînement séquentiel (McEwen et al., 2018) et à l'exercice physique seul (Eggenberger et al., 2015), bien que ce point nécessite des clarifications supplémentaires.

Troisièmement, l'approche simultanée est efficace en termes de temps et de ressources, représentant un argument clé dans le contexte de recherche d'interventions optimales chez les personnes âgées. L'entraînement séquentiel, qui consiste à réaliser séparément une séance physique et une séance cognitive, requiert deux fois plus de temps que l'entraînement simultané. Par exemple, un programme de 12 semaines comprenant deux séances hebdomadaires d'1 heure d'entraînement séquentiel totalise 48 heures, contre seulement 24 heures dans le cas d'un entraînement simultané, à sollicitation égale. Ainsi, une augmentation de la fréquence d'entraînement pourrait induire des réactions de stress et de fatigue susceptibles de contrecarrer les effets de l'entraînement (Lampit et al., 2014 ; Zhu et al., 2016).

3.1.2. Apports empiriques

La question de la modalité optimale de combinaison des entraînements physique et cognitif suscite un intérêt croissant, et les recherches commencent à s'y concentrer plus systématiquement. Sur le plan cognitif, l'entraînement simultané tend à produire de meilleurs effets que l'entraînement séquentiel, bien que les différences rapportées soient non significatives (Gavelin et al., 2021 ; Zhu et al., 2016) ou issues de comparaisons indirectes basées sur les tailles d'effet (Gheysen et al., 2018 ; Rieker et al., 2022). Cette tendance est particulièrement visible sur les fonctions exécutives (Rieker et al., 2022) ainsi que sur la cognition générale (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Rieker et al., 2022 ; Zhu et al., 2016). Du point de vue physique et moteur, la méta-analyse de Gavelin et al. (2021) indique une efficacité comparable entre les modalités simultanée et séquentielle. Toutefois, d'autres résultats suggèrent un effet plus marqué de l'entraînement simultané sur l'équilibre (Teraz et al., 2022). Cette observation sur l'équilibre est également rapportée par Rieker et al. (2022), qui notent des gains significatifs en force musculaire, absents dans les groupes séquentiels. Il est important de souligner que dans certaines études, le volume total d'entraînement était plus élevé dans les groupes séquentiels, ce qui biaise les comparaisons et pourrait masquer l'avantage potentiel de la simultanéité.

Ces résultats suggèrent que l'entraînement combiné, même en format simultané, ne compromet pas l'efficacité de la composante physique de l'intervention. Sur la base de ces éléments théoriques et empiriques, l'entraînement simultané apparaît comme une approche prometteuse, potentiellement plus efficiente que l'entraînement séquentiel pour l'amélioration des fonctions physiques, motrices et cognitives chez les personnes âgées. Par ailleurs, le modèle d'Herold et al. (2018) qui décompose l'entraînement simultané en deux nouvelles modalités [*Moving While Thinking* (incorporé) et *Thinking While Moving* (additionnel)] ouvre de nouveaux questionnements sur le design des programmes combinés simultanés.

3.2. Entraînement simultané additionnel ou incorporé : quelles différences ?

Gavelin et al. (2021) soulignent dans leur méta-analyse que l'un des enjeux majeurs de la recherche actuelle est d'identifier le contenu optimal de l'entraînement combiné afin d'orienter sa mise en œuvre pratique. Dans le même sens, Herold et al. (2018) appellent à mieux comprendre les qualités d'entraînement susceptibles d'améliorer efficacement et durablement la réserve cognitive. Ainsi, une question centrale dans l'étude de l'entraînement combiné simultané concerne la manière dont la tâche cognitive est intégrée à la tâche motrice.

3.2.1. Arguments théoriques

Herold et al. (2018) soutiennent que l'entraînement incorporé serait plus efficace que l'entraînement additionnel pour trois raisons principales : i) la proximité avec les situations de la vie quotidienne, ii) l'impossibilité de prioriser une des tâches et iii) des attentes plus élevées.

D'une part, les activités de la vie quotidienne sont plutôt similaires à des tâches incorporées qu'additionnelles (Raichlen & Alexander, 2017). Par exemple, il est davantage probable qu'une personne âgée marche dans la rue en essayant de se rappeler du chemin à emprunter et de l'itinéraire le plus court, plutôt que de réciter des chiffres à l'envers. D'autre part, l'entraînement additionnel perturberait la performance en forçant les participants, soit à partager leurs ressources cognitives entre les deux tâches, soit, s'ils n'en sont pas capables, à en prioriser une ou à basculer rapidement de l'une à l'autre (Al-Yahya et al., 2011 ; Holtzer et al., 2006). Ainsi, un effet de priorisation peut être observé dans les tâches additionnelles, alors que cela est impossible pour les tâches simultanées, puisque la réalisation de la tâche motrice est nécessaire à la tâche cognitive et inversement. Enfin, Herold et al. (2018) supposent que les attentes des participants (croyances sur l'efficacité de l'intervention) pourraient être plus élevées concernant l'entraînement incorporé, et moduler les effets de l'entraînement. Comme une tâche cognitive intégrée à une tâche motrice ressemble étroitement à des situations de la vie réelle, il est probable qu'une telle combinaison soit perçue comme pertinente et, par conséquent, entraîne un fort taux de compliance et de réussite de l'entraînement. Les auteurs recommandent une étude complète pour vérifier leur modèle, et déterminer si l'entraînement incorporé est plus efficace qu' : i) un entraînement physique/moteur seul, ii) un entraînement cognitif seul, iii) un entraînement séquentiel et 4) un entraînement additionnel.

3.2.2. Apports empiriques

À notre connaissance, très peu d'études ont comparé directement les effets des entraînements simultanés incorporés et additionnels auprès de personnes âgées. L'étude d'Eggenberger et al. (2015) constitue une contribution empirique précieuse à ce sujet. Elle compare deux types d'entraînement simultané : l'un incorporé (JV de danse sur une plateforme sensible à la pression, *Positive Gaming BV*), et l'autre additionnel (marche sur tapis accompagnée d'une tâche de mémoire verbale), à une condition d'entraînement physique (marche sur tapis), chez des personnes âgées de plus de 70 ans sans troubles cognitifs. Tous les programmes incluaient également des exercices d'équilibre et de renforcement musculaire. L'intervention a duré six mois, à raison de deux séances hebdomadaires d'une heure. Des tests ont été réalisés en début de programme, au milieu (3 mois), à la fin (6 mois), puis en rétention (1

an après la fin des programmes) (résultats présentés dans la partie 2.4 de ce chapitre). Les résultats montrent, pour les trois groupes, une amélioration de la vitesse de traitement, de la flexibilité cognitive, de la mémoire de travail, de l'attention soutenue et de la mémoire visuelle et verbale à long terme, mais non de la mémoire verbale à court terme. Une première comparaison a testé si les entraînements simultanés étaient plus efficaces sur certaines fonctions cognitives que l'entraînement physique, cependant, aucun effet n'a été détecté. Une seconde comparaison a cherché une différence entre les deux entraînements simultanés. Concernant la mémoire de travail, les résultats indiquent une tendance significative sur l'effet d'interaction entre le temps et le type d'intervention (p = 0,051). En effet, l'entraînement incorporé s'est amélioré de manière continue alors que l'entraînement additionnel a montré une amélioration lors des trois premiers mois, puis un déclin les trois suivants. Il convient cependant de souligner l'absence de groupe contrôle passif dans ce protocole, ce qui limite l'interprétation des effets spécifiques aux modalités d'entraînement.

À ce jour, une seule méta-analyse a examiné la différence entre les modalités incorporée (uniquement des exergames) et additionnelle au regard des performances motrices et en situation de DT, bien qu'aucune des études intégrées ne compare directement ces deux modalités entre elles. Les résultats montrent que les deux approches ont des effets bénéfiques similaires sur l'équilibre et la vitesse de marche, sans différence significative entre elles (Teraz et al., 2022). Aucune des deux modalités n'a d'effet sur la vitesse de marche en condition de DT.

En somme, les données disponibles, bien que limitées, suggèrent que les entraînements simultanés incorporés pourraient offrir des bénéfices légèrement supérieurs à ceux des modalités additionnelles, notamment en ce qui concerne la mémoire de travail et certaines fonctions motrices en situation de DT. Toutefois, en l'absence de comparaisons systématiques et compte tenu des limites méthodologiques des études existantes, ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Des recherches supplémentaires, incluant des comparaisons directes et rigoureusement contrôlées, sont nécessaires pour déterminer la modalité d'entraînement la plus efficace et la mieux adaptée aux besoins des personnes âgées.

4. DIFFÉRENTES MODALITÉS DE L'ENTRAÎNEMENT INCORPORÉ

Au-delà de la distinction binaire entre tâches incorporées et additionnelles, il est essentiel de reconnaître que l'entraînement incorporé ne constitue pas une catégorie homogène (tout comme l'entraînement additionnel, bien que ce dernier ne soit pas abordé dans cette partie). En effet, les formes d'intégration cognitive au sein d'une tâche physique/motrice sont multiples et variées. Elles incluent, par

exemple, des exercices de déplacement à règles complexes (suivre des consignes motrices intégrant des éléments cognitifs tels que des séquences de couleurs, de directions ou d'itinéraires à mémoriser), des pratiques corporelles traditionnelles (Taï-chi, Qi Gong, danse), des sports de coopération ou d'opposition (sports collectifs, sports de combat, arts martiaux), ainsi que des jeux vidéo actifs (exergames). L'un des enjeux majeurs de la recherche actuelle est donc d'évaluer empiriquement ces différentes formes d'entraînement incorporé, afin de mieux comprendre leurs spécificités et leur efficacité respective, tant sur les plans cognitif, physique, moteur que sur les capacités de DT.

La présente thèse s'intéresse plus spécifiquement à trois modalités représentatives de cette diversité : i) des activités motrices et cognitives complexes, issues de la coopération et de l'opposition, ii) des exergames grand public, et iii) une nouvelle génération d'exergames assistés par un mur immersif interactif. Ces trois formes d'entraînement incorporé semblent particulièrement prometteuses pour stimuler de manière conjointe les capacités physiques, motrices, cognitives et de DT des personnes âgées, et font donc l'objet d'une analyse de la littérature approfondie dans cette section. Leurs modalités sont d'abord comparées à travers leurs points communs et leurs différences, avant que leurs effets spécifiques ne soient détaillés.

4.1. Des activités motrices et cognitives complexes issues de la coopération et de l'opposition

4.1.1. Intérêts théoriques

Comme développé dans la section 1.1.4 de ce chapitre, les Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C) reposant sur la coopération et l'opposition se situent à l'extrémité du continuum des interactions sociales dans l'entraînement combiné. Elles constituent des leviers intéressants pour stimuler les fonctions exécutives des personnes âgées. La coopération se définit comme la réalisation conjointe d'actions visant un objectif commun, nécessitant la coordination entre au moins deux individus. L'opposition, quant à elle, implique une confrontation entre adversaires qui cherchent à atteindre le même objectif, et peut engendrer des dynamiques de coopération au sein d'une même équipe. Ces types d'interactions apportent une variabilité importante dans l'environnement d'apprentissage, considérée comme bénéfique pour l'entraînement cognitif.

Plusieurs études menées auprès de sportifs de haut niveau impliqués dans des activités de coopération et/ou d'opposition révèlent un lien entre le niveau sportif et cognitif, et suggèrent que l'entraînement à ce type d'activité physique pourrait favoriser l'amélioration des fonctions exécutives (Elferink-Gemser et al., 2018 ; Paul et al., 2024 ; Vestberg et al., 2012 ; C.-H. Wang et al., 2015). Audiffren

et al. (2011) recommandent d'ailleurs d'explorer les effets de ce type d'activité chez les personnes âgées. En effet, ces pratiques confrontent les individus à des situations instables et imprévisibles, nécessitant une adaptation rapide du comportement en temps réel. Dans un cadre coopératif, les participants doivent planifier leurs actions, anticiper les intentions d'autrui, prendre des décisions tactiques et ajuster leurs réponses en fonction de l'évolution des situations (Gréhaigne & Dietsch, 2015 ; Walsh, 2014). Plus particulièrement, la capacité à inhiber une décision planifiée et à s'adapter à une nouvelle situation sollicite des fonctions exécutives telles que l'inhibition et la flexibilité cognitive. La mémoire de travail est également engagée : elle permettrait d'évaluer les différentes informations d'une situation et de les manipuler cognitivement pour produire une réponse pertinente (Vestberg et al., 2012), notamment dans une dimension visuelle et spatiale (analyser, comprendre, se représenter l'espace). La planification est aussi activée afin de créer une stratégie et d'orchestrer une action adaptée. L'opposition, elle, accentue ces exigences en raison de la présence d'adversaires qui exigent un traitement cognitif plus complexe.

Les activités physiques de coopération et d'opposition, par leurs propriétés intrinsèques, offrent une grande variabilité qui peut être bénéfique, puisque les apprentissages sont produits grâce à la diversité dans les tâches d'apprentissage et dans les types d'interactions proposées (Schmidt & Bjork, 1992). Cette hypothèse sous-tend qu'il existe une relation entre la variété des combinaisons de processus impliqués dans un programme d'entraînement et l'ampleur des effets de transfert (Green & Bavelier, 2008). Ces activités pourraient ainsi jouer un rôle similaire à celui des entraînements cognitifs classiques dans l'amélioration des fonctions exécutives (Fillit et al., 2002 ; Hertzog et al., 2009). Wang et al. (2015) soulignent d'ailleurs l'intérêt d'exploiter des activités physiques faisant appel aux fonctions cognitives pour les personnes âgées. Il semble intéressant d'envisager l'utilisation d'activités physiques de coopération et d'opposition qui mobiliseraient potentiellement plus intensément certaines fonctions exécutives (i.e., planification, inhibition, flexibilité mentale, mémoire de travail visuospatiale) que les activités physiques habituellement proposées aux personnes âgées (e.g., marche, gymnastique sur chaise, yoga).

4.1.2. Apports empiriques

Plusieurs travaux soutiennent l'intérêt cognitif des pratiques collectives intégrant coopération et opposition (Schmidt & Bjork, 1992). Si les environnements virtuels, comme les exergames, créent des situations de coopération et d'opposition et que leurs effets sont de plus en plus évalués, les études portant sur des pratiques naturelles, issues des sports collectifs, restent encore rares.

La majorité des recherches existantes chez les personnes âgées sur ce sujet s'intéresse aux effets physiques et moteurs. Des études menées sur la pratique du football montrent par exemple une amélioration de la densité minérale osseuse et des capacités fonctionnelles (pour revue, Bangsbo et al., 2015). Le floorball, variante du hockey, a également démontré des effets positifs sur la force musculaire et la fonction physique chez des hommes âgés de 65 à 75 ans (Vorup et al., 2017). L'étude de Pedersen et al. (2017), menée auprès de participants de 67 à 93 ans, compare un groupe pratiquant des sports collectifs avec ballon (3 sports, « floorball » : hockey adapté ; « cone ball » : lancer des balles sur des cônes adverses ; « hula goal » ; lancer des balles à travers des cerceaux) à un autre groupe suivant un entraînement en résistance, tous deux confrontés à un groupe contrôle. Après 12 semaines d'entraînement, à raison d'une séance hebdomadaire, des bénéfices ont été observés dans les deux groupes actifs, notamment en termes de force musculaire. Toutefois, la motivation intrinsèque et le plaisir perçu étaient significativement plus élevés dans le groupe de sports collectifs, probablement grâce aux interactions sociales induites au cours des exercices. Plus récemment, nous avons mené une étude auprès de personnes âgées en bonne santé (MMSE moyen = 28/30) évaluant les effets d'un programme de trois mois d'activités physiques basées sur la coopération et l'opposition (Béraud-Peigné et al., 2022). Comparativement à un groupe contrôle inactif, le groupe expérimental a montré une amélioration de la mémoire visuospatiale à court terme et un maintien de l'équilibre dynamique, capacité dégradée chez le groupe contrôle.

Cette étude a fait l'objet d'une publication et est disponible en Annexe 2.

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2022). **Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées.** *NPG Neurologie-Psychiatrie-Gériatrie, 22*(129), 149-157. Doi : 10.1016/j.npg.2021.08.002

Bien que peu explorées à ce jour, les activités motrices et cognitives fondées sur la coopération et l'opposition semblent constituer un environnement naturel particulièrement stimulant pour l'entraînement des personnes âgées. Néanmoins, leur efficacité, notamment en comparaison avec des environnements virtuels tels que les exergames, reste à documenter.

4.2. Les exergames

4.2.1. L'intérêt des exergames grand public

Ces dernières années, les exergames, jeux vidéo actifs, sont devenus de plus en plus populaires pour impliquer les personnes âgées dans un entraînement combiné simultané incorporé.

L'environnement virtuel dans lequel ils s'intègrent offre des possibilités d'entraînements diversifiés, riches et complexes. De plus, ils peuvent être pratiqués de manière collective et sont susceptibles d'entraîner des situations de coopération et d'opposition entre les joueurs.

Outre l'intérêt qu'ils présentent en termes de sollicitation physique, motrice et cognitive, leur développement croissant s'explique par leur facilité d'utilisation dans les contextes cliniques, associatifs ou à domicile, ainsi que leur coût relativement faible. Une variété d'exergames commerciaux [appelés « *recreational exergames* », en français *« exergames récréatifs »* dans la classification de Manser et al. (2025)] est disponible, tels que les jeux *Microsoft Xbox* utilisant les capteurs *Kinect*, *Dance Dance Revolution*, ou encore la *Nintendo Wii*. Cette dernière est la plateforme d'exergames la plus couramment utilisée auprès des personnes âgées (Pacheco et al., 2020). Depuis 2017, la *Nintendo Switch* l'a progressivement remplacée. Face à l'intérêt suscité par les exergames commerciaux, des jeux développés spécifiquement pour les personnes âgées ont également vu le jour en laboratoire [appelés « *serious exergames* », en français « *exergames sérieux* » dans la classification de Manser et al. (2025)], bien qu'ils soient peu abordés ici [e.g., *iStoppFalls* (Marston et al., 2016)].

Les études actuelles indiquent que les exergames bénéficient d'un niveau élevé de plaisir chez les personnes âgées (Gallou-Guyot et al., 2020 ; Graves et al., 2010 ; Nawaz et al., 2016 ; Valenzuela et al., 2018). Ils encouragent les joueurs à faire des mouvements au-delà des exigences du jeu (Lyons et al., 2014) et entraînent une compliance plus élevée face aux programmes sans technologies (Valenzuela et al., 2018). Cela favorise la motivation à l'entraînement (Valenzuela et al., 2018) conduisant à une forte compliance (e.g., Adcock, Fankhauser, et al., 2020 ; Da Silva Júnior et al., 2021 ; Maillot et al., 2012 ; Schoene et al., 2013 ; Valenzuela et al., 2018 ; Wüest et al., 2014) et facilitant potentiellement l'efficacité des entraînements (X. Chen et al., 2023). Ainsi, dans un objectif de transfert vers la vie quotidienne et de compliance à l'activité physique, les exergames pourraient s'imposer comme des outils intéressants pour l'entraînement des personnes âgées.

4.2.2. Les effets des exergames sur les capacités cognitives, physiques et double-tâche

Les études se sont multipliées afin de tester les effets des exergames auprès des personnes âgées. Ainsi, une vingtaine de méta-analyses font l'objet de publications depuis 2016, principalement concernant les effets cognitifs (Gavelin et al., 2021 ; Howes et al., 2017 ; Jiang et al., 2022 ; Manser et al., 2024 ; Soares et al., 2021 ; Stanmore et al., 2017 ; Yen & Chiu, 2021) et physiques et moteurs (X. Chen et al., 2023 ; Y. Chen et al., 2021 ; Deng et al., 2024 ; Donath et al., 2016 ; Fang et al., 2020 ; Hernandez-Martinez et al., 2024 ; Howes et al., 2017 ; Janhunen et al., 2021 ; Pacheco et al., 2020 ; Suleiman-Martos

et al., 2022 ; Taylor et al., 2018) auprès des personnes âgées. Les capacités de DT restent très peu évaluées.

Au niveau cognitif, par exemple, la méta-analyse de Jiang et al. (2022) incluant 15 RCT, avec des participants allant de 60 à 86 ans, indique que les exergames (tout type) améliorent les fonctions exécutives, évaluées à l'aide de tests neuropsychologiques, notamment l'inhibition (DMS = 0,415, p = 0,009), la flexibilité cognitive (DMS = 0,243, p = 0,005) et la mise à jour de la mémoire de travail (DMS = 0,366, p = 0,002) par rapport à un groupe contrôle (actif ou inactif). Des résultats similaires sont retrouvés sur le niveau cognitif (Manser et al., 2024 ; Yen & Chiu, 2021), les fonctions cognitives globales (Gavelin et al., 2021 ; Howes et al., 2017 ; Stanmore et al., 2017), les fonctions exécutives (Manser et al., 2024 ; Stanmore et al., 2017), la mémoire (Yen & Chiu, 2021) et l'attention . Cependant, tout comme les méta-analyses concernant les effets de l'entraînement combiné, plusieurs méta-analyses sur les exergames ne retrouvent pas d'effet sur la mémoire, le raisonnement, l'apprentissage, les habiletés visuospatiales (Manser et al., 2024 ; Stanmore et al., 2017) ou encore les fonctions exécutives et l'attention (Yen & Chiu, 2021). La méta-analyse de Manser et al. (2024) indique que plusieurs modérateurs pourraient avoir un rôle sur les effets des exergames sur les capacités cognitives, notamment le groupe (résultats présentés dans la partie 1.1.4 de ce chapitre), la modalité d'intégration de la tâche cognitive (incorporée, additionnelle), mais également la position corporelle (debout sans transfert de poids, debout avec transfert de poids, assis). L'entraînement incorporé produit des bénéfices sur l'attention complexe, ce qui n'est pas le cas de l'additionnel. De plus, seul l'entraînement avec transfert de poids entraîne des améliorations sur la cognition globale.

Concernant les aspects physiques, la méta-analyse de Fang et al. (2020) s'est concentrée sur l'évaluation de six variables d'équilibre (tous les résultats ne sont pas détaillés ici). Elle révèle que, comparativement à un groupe contrôle (inactif, entraînement physique ou cognitif) les exergames (*Wii, Kinect, Dance Dance Revolution*) améliorent l'équilibre dynamique, évalué par le TUG (g = 0,36, p < 0,001), l'équilibre perçu (g = 0,31, p = 0,02) ou encore le test 30 secondes assis-debout (g = 0,78, p = 0,003). En revanche, aucun effet n'a été observé pour l'équilibre statique (g = 0,22, p = 0,42). D'autres méta-analyses ont montré les bénéfices des exergames sur les capacités physiques et motrices, notamment sur la marche (Janhunen et al., 2021), la mobilité fonctionnelle (Donath et al., 2016), la force musculaire et la capacité aérobie (Deng et al., 2024). Cependant, de manière similaire aux effets cognitifs, certaines méta-analyses ne révèlent pas d'effet des exergames, notamment sur la souplesse et la composition corporelle (Deng et al., 2024), l'équilibre dynamique (Taylor et al., 2018), la capacité aérobie et la force de préhension (Hernandez-Martinez et al., 2024).

Concernant les capacités de DT, l'*overview* de Gallou-Guyot et al. (2020) intégrant 11 revues et méta-analyses sur les effets des exergames n'a pu inclure aucune étude évaluant les capacités de DT. Les auteurs expliquent cela par le manque d'évaluations standardisées pour la DT. Il convient toutefois de souligner que plusieurs études interventionnelles évaluent ces effets et montrent des bénéfices. Par exemple, il est observé une amélioration des performances motrices à un TUG couplé à une tâche de fluence verbale (Dance Dance Revolution, Schoene et al., 2013) et à une DT motrice-motrice (TUG réalisé en portant un verre rempli d'eau), mais pas de bénéfice sur les performances sur une DT cognitivo-motrice (TUG couplé à une tâche de décompte de 3 en 3) (tapis interactif, H.-T. Peng et al., 2020). De plus, une amélioration de l'inhibition (pourcentage d'erreurs au test de Stroop) en DT, mais pas du contrôle postural est retrouvée (exergame projeté au sol, Gallou-Guyot et al., 2023).

Bien que davantage d'études soient nécessaires pour confirmer les effets des exergames, ils semblent être efficaces pour améliorer certaines capacités cognitives, notamment les fonctions exécutives, ainsi que la cognition globale. Il en est de même concernant les capacités physiques et motrices.

4.2.3. Effets des exergames comparativement à d'autres types d'intervention

L'hégémonie des exergames comparativement aux interventions conventionnelles (i.e., activité physique, entraînement cognitif, DT) fait débat. Concernant la cognition, les méta-analyses s'intéressent principalement au niveau cognitif global (X. Chen et al., 2023 ; Soares et al., 2021 ; Stanmore et al., 2017). Soares (2021)[1], Stanmore (2017)[2] et leurs collaborateurs indiquent que les exergames ont un effet supérieur à l'activité physique. Cependant, Chen et al. (2023)[3] infirment ces propos en montrant que les effets des exergames sont équivalents à ceux de l'entraînement physique. Soares et al. (2021) complètent ces résultats en indiquant un effet similaire des exergames par rapport à l'entraînement (tout type) sur les fonctions exécutives.

La méta-analyse de Gavelin et al. (2021) compare également les effets des exergames, ainsi que des entraînements simultanés (i.e., incorporé et additionnel, hors exergames) et séquentiels, par rapport

[1] Exergames utilisés : *Kinect Xbox 360, Impact Dance Platform, Nintendo Wii, Bike Labyrinth.*

[2] Exergames utilisés : *Nintendo Wii,* jeux de danse interactifs, entraînements interactifs avec un vélo ou un tapis roulant, kayak en réalité virtuelle, *Kinect Xbox 360*.

[3] Exergames utilisés : *Nintendo Wii, Xbox 360's Kinect, Tymo, GRAI.*

à l'entraînement physique sur un score global de cognition et un score global physique. Le protocole de l'étude est détaillé dans la partie 2.1 de ce chapitre. Alors que les entraînements séquentiels et simultanés (incorporé et additionnel, hors exergames) sont plus efficaces que l'entraînement physique sur le score global de cognition, il n'y a pas de différence entre les exergames et l'entraînement physique. De plus, l'entraînement simultané est significativement plus efficace que les exergames. En revanche, aucun des trois entraînements combinés, c'est-à-dire ni l'entraînement simultané (hors exergames), ni séquentiel, ni les exergames, ne montre de différence avec l'entraînement cognitif. Concernant le score physique global, les effets des trois types d'entraînements combinés sont similaires à ceux de l'entraînement physique, mais uniquement les entraînements simultané (hors exergames) et séquentiel sont plus efficaces que l'entraînement cognitif (et non les exergames). Quatre autres méta-analyses s'intéressent à la comparaison de l'entraînement physique aux exergames. Les résultats sont contradictoires, Chen (2021) et Taylor (2018) et leurs collaborateurs montrant des résultats plus importants des exergames par rapport à l'activité physique, sur le contrôle postural, l'équilibre dynamique et le risque de chute. Chen et al. (2023) ne révèlent pas de différence sur les capacités physiques générales, quand Donath et al. (2016) indiquent que les programmes d'entraînement basés sur l'équilibre améliorent davantage l'équilibre et la mobilité fonctionnelle que les exergames. Par ailleurs, les niveaux de preuves sont faibles et les études (Howes et al., 2017 ; Soares et al., 2021 ; Stanmore et al., 2017) déplorent une grande hétérogénéité, se répercutant négativement sur les résultats.

À notre connaissance, il n'existe pas de méta-analyse comparant les effets des exergames aux entraînements physiques ou cognitifs sur la DT. Cependant, plusieurs études interventionnelles ont montré des effets positifs des exergames sur les capacités de DT, comparativement à un programme d'entraînement physique (Barcelos et al., 2015 ; Pichierri et al., 2012) ou multicomposantes (marche, renforcement musculaire, équilibre) (R.-Y. Wang et al., 2021).

4.2.4. Limites actuelles des recherches sur les exergames

Comme l'indiquent les deux sections précédentes, les effets des exergames ont fait l'objet d'un nombre croissant d'études dans le champ du vieillissement. Plusieurs méta-analyses ont émergé, mais leurs résultats restent hétérogènes. Alors qu'il pourrait sembler que les exergames aient des effets physiques et cognitifs similaires aux entraînements physique, cognitif, simultané (hors exergames) et séquentiel, voire supérieurs sur le plan cognitif étant donné la richesse cognitive qu'ils semblent proposer, les résultats actuels sont mitigés. Il est donc probable que les demandes physiques, motrices et cognitives de certains exergames soient plus faibles comparées aux entraînements conventionnels. Effectivement, si l'intensité physique est un vecteur central, certains types d'exergames ne semblent pas

permettre de suivre les recommandations d'une intensité au moins modérée (Gallou-Guyot et al., 2020 ; W. Peng et al., 2011). En effet, la méta-analyse de Hernandez-Martinez et al. (2024), qui n'avait pas trouvé d'amélioration sur le TM6, justifient ces résultats en indiquant que les interventions utilisant des exergames sont généralement réalisées à une intensité faible à modérée, notamment durant les premières semaines, en raison des adaptations neuromusculaires initiales et des courtes durées de jeu qui ne peuvent pas être individualisées selon le niveau de chaque participant. De plus, les modifications de la forme cardiorespiratoire et de la force musculaire sont considérées comme une condition à l'analyse des modifications cognitives, étant donné qu'elles sont au moins en partie suscitées par leur amélioration. Pourtant, peu d'études s'y intéressent conjointement avec les effets cognitifs. Certaines exceptions rapportent un progrès faible des performances physiques, suggérant le manque de charge de l'entraînement en exergames sur les capacités métaboliques (Anderson-Hanley et al., 2017 ; Larsen et al., 2013 ; Martin-Niedecken & Mekler, 2018 ; Taylor et al., 2018). Ainsi, il est envisageable qu'il n'y ait pas eu d'exploitation totale de la synergie entre les effets de facilitation et de guidage pour observer des bénéfices cognitifs. Enfin, d'autres modalités de pratique, comme le renforcement musculaire et la sollicitation motrice complexe, ont montré leurs bénéfices. Cependant, les exergames ne permettent pas toujours un entraînement de ce type. Barnes (2015) suggère des exercices qui sollicitent l'apprentissage, la coordination, plusieurs groupes musculaires et une stimulation cognitive continue. Ainsi, bien que la ludification puisse faciliter la conception d'interventions motivant le changement de comportement (Johnson et al., 2016), il faut s'assurer que les exigences cognitives et physiques soient au minimum tout aussi stimulantes que les exercices plus traditionnels.

De nombreuses divergences méthodologiques apparaissent concernant les méta-analyses intégrées dans cette partie. Les populations étudiées regroupent parfois des adultes d'âge moyen et des personnes âgées (e.g., Manser et al., 2024), des individus avec ou sans pathologie (e.g., Stanmore et al., 2017), allant de personnes en bonne santé à celles présentant un trouble cognitif léger ou une démence (e.g., Soares et al., 2021). De plus, les groupes contrôles varient fortement : certains sont inactifs, d'autres mélangent participants actifs et inactifs, ce qui complexifie l'interprétation des effets observés. Lorsqu'ils sont comparés à des programmes d'entraînement physique, les exergames sont souvent mis en regard avec des interventions très diverses en termes de stimulation physique et motrice, alors que les effets de ces dernières peuvent varier considérablement selon leur nature physique et motrice. De plus, les exergames eux-mêmes constituent une catégorie hétérogène d'outils, incluant aussi bien des jeux commerciaux que des dispositifs développés en laboratoire. À cela s'ajoute le fait que très peu d'études évaluent leurs effets sur les capacités de DT, ou comparent les effets des exergames à un entraînement cognitif classique. Enfin, les résultats prometteurs rapportés par la méta-analyse de Stanmore et al.

(2017), pionnière sur le sujet, ont été remis en question par Sala et al. (2021) qui estiment que les tailles d'effet ont été surestimées en raison de biais méthodologiques importants[1]. Ainsi, le caractère récent de ces travaux n'offre pas un niveau de preuve suffisant, en particulier concernant le débat quant à la supériorité des exergames par rapport aux interventions conventionnelles (combinées ou à une modalité).

En somme, bien que les exergames représentent une modalité prometteuse, notamment pour stimuler la motivation et la compliance des personnes âgées, les résultats concernant leur efficacité doivent encore être consolidés par des recherches rigoureuses, contrôlées et suffisamment puissantes, en particulier dans le domaine spécifique de la DT.

4.3. Les exergames assistés par un mur immersif et interactif

Les recherches sur les exergames se sont condensées sur l'évaluation d'une première génération (e.g., *Wii, Xbox, Kinect*), alors qu'une nouvelle catégorie d'Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I) se développe depuis quelques années (e.g., *Lumo Play, Motion Magix, Play Lü, Vertigo Système, Iwall, ExerCube, Neo One*, voir Figure 9).

Les EM2I consistent en un écran tactile de plusieurs mètres, devant ou sur lequel un ou plusieurs joueurs réalisent des mouvements pour interagir avec le mur (Röglin et al., 2023). Des capteurs de mouvement et/ou des objets (e.g., ballons) peuvent également être intégrés sur certains EM2I pour interagir. Ces nouveaux exergames ont fait l'objet de très peu d'études, hormis les exceptions réalisées avec le dispositif *Play Lü* (Roure et al., 2021, 2022), *ExerCube* (Ketelhut et al., 2022 ; Martin-Niedecken et al., 2019, 2020, 2021 ; Martin-Niedecken & Mekler, 2018), *Iwall* (Sinnemäki et al., 2025) et *Neo One* (Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023 ; Béraud-Peigné et al., 2024). Par ailleurs, la majorité de ces études ont été effectuées auprès d'enfants ou de jeunes adultes, et non de personnes âgées (excepté pour Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023 ; Béraud-Peigné et al., 2024).

4.3.1. Intérêts théoriques

Les EM2I possèdent des caractéristiques spécifiques avantageuses (Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2025), schématisées à travers la Figure 10, offrant un entraînement multi-domaine mêlant

[1] Selon les auteurs, les biais méthodologiques sont les suivants : erreurs dans le calcul de la taille d'effet, hétérogénéité élevée, pas d'ajustement de la taille d'effet.

stimulations naturelles et virtuelles : i) immersion grâce à la virtualité ii) stimulation physique importante, iii) activité motrice complexe, iv) sollicitation cognitive, v) interactions sociales multiples.

Figure 9. Exemple d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (Neo One par NeoXperiences, jeu Ice Cream Memory)

- **Immersion**

Comparativement aux exergames conventionnels, les EM2I sont pourvus de capacités immersives plus conséquentes qui offrent un environnement potentiellement adéquat aux participants afin d'être totalement imprégnés dans la séance. Quand les exergames commerciaux traditionnels sont généralement reliés à un écran de télévision, les EM2I sont projetés sur des murs. Ils ne possèdent ni casque ni équipement, une solution de taille face aux répercussions négatives que peuvent avoir les casques de réalité virtuelle, avec notamment l'apparition de nausées, vertiges et malaises (Campo-Prieto et al., 2021). Hormis le fait que l'immersion puisse augmenter l'intensité de la séance (Finkelstein & Suma, 2011), provoquer une perception de l'effort plus faible (Martin-Niedecken et al., 2019) et générer de meilleures performances (Murray et al., 2016), elle amplifierait l'activité des régions cérébrales associées notamment aux fonctions exécutives (Kober et al., 2012). Selon Temprado (2021), l'inconsistance des résultats sur les effets cognitifs des programmes d'exergames pourrait être causée par une sous-exploitation de l'immersion, alors que la virtualité et les environnements immersifs engendreraient une stimulation et une adaptation intéressante des comportements perceptivo-moteurs des participants. Ainsi, K. T. Huang (2020) propose de combiner exergames et environnements virtuels immersifs afin

d'augmenter l'efficience des entraînements sur la santé cérébrale. Les EM2I pourraient ainsi être de bons compromis pour augmenter l'efficience de l'entraînement multi-domaine sans générer d'événements négatifs causés par la réalité virtuelle.

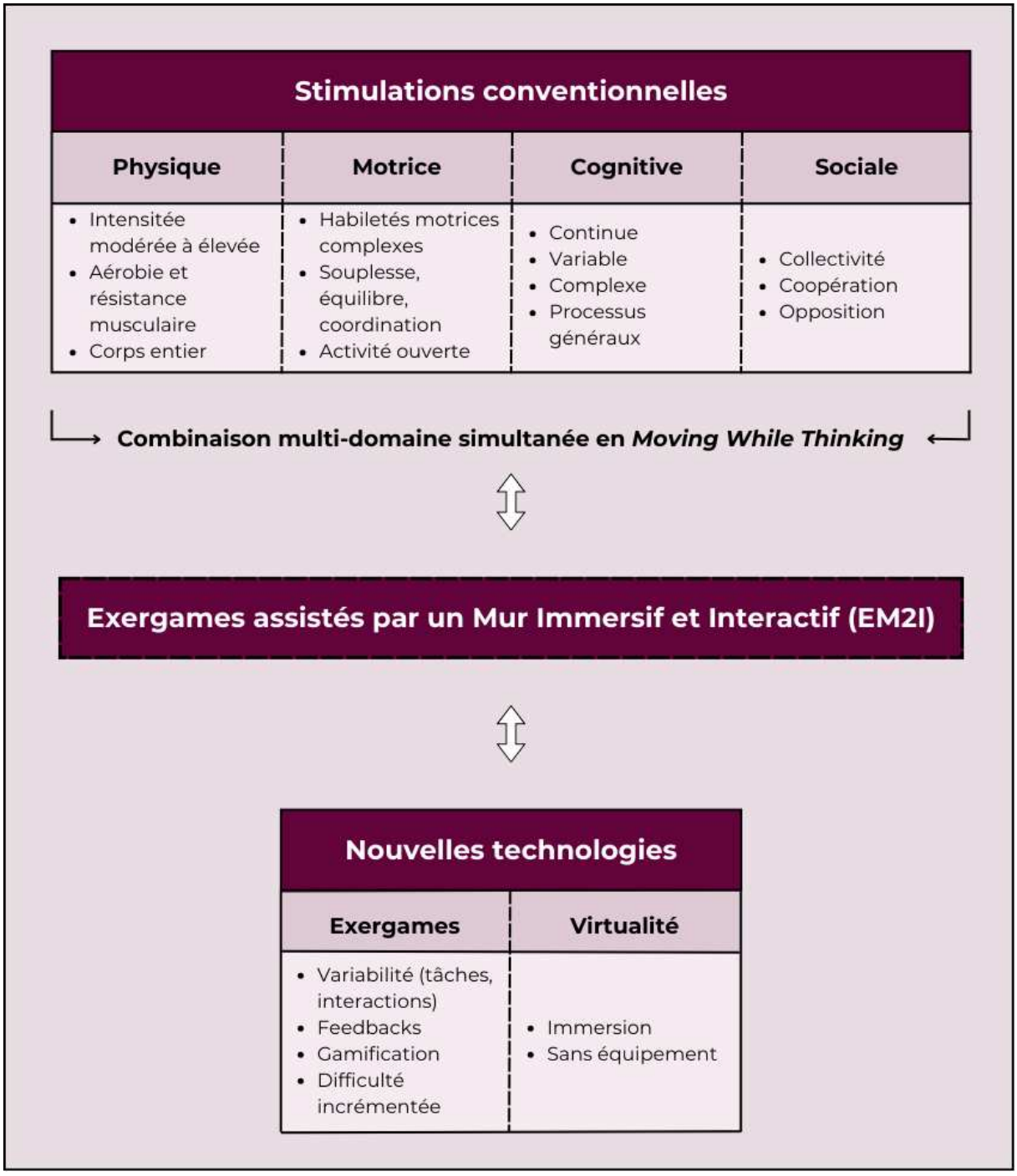


Figure 10. Description des modalités des EM2I
(Béraud-Peigné, Maillot et al., 2025)
Note. *EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif*

- **Intensité physique**

Les EM2I pourraient induire une intensité physique plus élevée que celle de leurs homologues. Une récente étude réalisée avec le dispositif *Play Lü* (Roure et al., 2022) démontre qu'il génère une intensité modérée à élevée, mesurée à l'aide d'accéléromètres, chez des adolescents. De même, le mur interactif et immersif Neo One produit une intensité modérée à élevée chez les personnes âgées (Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023 ; Béraud-Peigné et al., 2024) mesurée grâce à des cardiofréquencemètres. Cette intensité correspond à la cible recommandée (Colcombe & Kramer, 2003 ; Swain et al., 2012) pour favoriser des bénéfices sur les fonctions physiques et cognitives. Un tel niveau d'intensité peut s'expliquer d'une part, par la nature de l'interaction exigée par la taille de l'aire de jeu, entraînant plus de mouvements de l'ensemble du corps que ceux des exergames conventionnels, laissant place à une liberté de mouvement qui incite à la dépense énergétique.

D'autre part, les EM2I donnent lieu à une sollicitation du corps entier alors qu'une stimulation disparate composée uniquement de mouvements d'une partie du corps entraînerait des effets plus faibles sur l'intensité des séances et ses bénéfices (W. Peng et al., 2011). Pour ajouter à cela, les joueurs d'EM2I ne peuvent pas adopter de stratégies d'économie d'énergie (notamment observées sur *Nintendo Wii* et *Switch*) et sont inconsciemment contraints de réaliser des mouvements toujours aussi complexes au fil des séances, utilisant l'ensemble du corps pour atteindre leur but (e.g., utiliser le haut du corps pour lancer la balle, se déplacer rapidement pour toucher les cibles, se baisser pour récupérer les balles au sol).

- **Activité motrice complexe**

En ce qui concerne le plan moteur, les EM2I entraînent des mouvements faisant appel aux habiletés motrices générales, ayant la capacité d'augmenter l'intensité physique (Diamond & Ling, 2019a). Ils encouragent la coordination, l'équilibre dynamique ainsi que la souplesse à travers une grande liberté de mouvement. Ils ont également une validité écologique, par leur similitude avec les activités de la vie quotidienne, ce qui augmente les effets de transfert (Herold et al., 2018) et permet de lutter contre le phénomène de « *Posture First* » qui incite les personnes âgées à privilégier leur équilibre et leur posture au détriment de la réalisation de la tâche cognitive (Woollacott & Shumway-Cook, 2002).

- **Sollicitation cognitive**

Au niveau cognitif, les EM2I offrent une stimulation cognitive continue, engageant une concentration mentale plus élevée qu'un entraînement physique conventionnel (Martin-Niedecken et al., 2021). Les effets des exergames sur la cognition dépendent fortement de la demande cognitive de l'environnement ludique et l'ajout d'une stimulation cognitive intense potentialise les effets sur le cerveau et la cognition (Gheysen et al., 2018). Ces exigences cognitives générées par les EM2I sont d'autant plus importantes qu'elles prennent naissance par des jeux sollicitant des processus cognitifs très divers, et ce de manière concomitante. Par exemple, les joueurs sont amenés à retenir des informations afin d'être les plus efficaces possible (i.e., mémoire à court terme et de travail), passer rapidement d'une information à une autre (i.e., flexibilité cognitive), combiner une action motrice à une tâche cognitive (i.e., DT) au même titre que planifier leur action et mettre en place des stratégies (i.e., planification), ne pas prendre en compte certaines informations pour se concentrer sur celles essentielles (i.e., inhibition), tout cela en analysant de multiples informations visuospatiales (i.e., fonctions visuospatiales). Les exigences cognitives sont créées par le système (e.g., trouver la bonne cible puis lancer la balle au bon endroit et au bon moment) mais également par des interactions sociales sous-jacentes aux jeux (e.g., coopérer avec son équipe pour obtenir plus de points que l'équipe adverse).

- **Interactions sociales**

Alors que les exergames commerciaux comme la *Wii* et la *Kinect* se jouent généralement à deux joueurs maximum (jusqu'à 4, voire 6 dans certaines conditions, mais non optimales pour l'entraînement), certains EM2I peuvent accueillir une dizaine de participants, incitant naturellement des situations de coopération et/ou d'opposition. Les EM2I encouragent les participants à communiquer pour mettre en place des stratégies et planifier ensemble les actions à réaliser lors des jeux. Ces activités ont déjà montré des résultats encourageants (Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023 ; Béraud-Peigné et al., 2024) sur l'amélioration des fonctions cognitives des personnes âgées. Les exergames collectifs permettent également d'obtenir une intensité plus élevée (Roure et al., 2022) et de meilleurs résultats sur l'amélioration des capacités fonctionnelles des personnes âgées comparés aux exergames pratiqués seuls (Da Silva Júnior et al., 2021).

Ainsi, les EM2I semblent être une option prometteuse, présentant des modalités manifestes pour contrer les limites des entraînements combinés conventionnels (i.e., activités fermées, non interactives, individuelles) et des exergames conventionnels (i.e., manque d'intensité physique et cognitive, faible immersion). Cependant, en raison de leur coût élevé par rapport aux exergames conventionnels et de la

taille imposante des dispositifs, les EM2I ne sont pas adaptés à une acquisition individuelle ni à une pratique à domicile. Leur utilisation s'adresse davantage aux collectivités ou aux structures accueillant du public (e.g., association, club, Maison Sport Santé) qui peuvent équiper leurs locaux de ces dispositifs. La pratique, comme toute autre activité physique, peut être libre ou encadrée en fonction des besoins du public cible. Ainsi, la technologie ne se substitue pas nécessairement à l'intervention humaine et peut nécessiter un encadrement par un professionnel de l'activité physique adaptée, au moins initial, pour une utilisation optimale et sécuritaire.

4.3.2. Apports empiriques

Compte tenu de leur récent développement, le déploiement et l'évaluation des EM2I auprès des personnes âgées en sont encore à leurs prémices. Deux études ont été menées à l'aide du dispositif Neo One (NeoXperiences) par notre équipe de recherche (Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023 ; Béraud-Peigné et al., 2024). La première, menée auprès de 38 adultes âgés (M = 68,26) en bonne santé a testé une seule session d'exergames afin d'évaluer l'expérience globale [eXpérience Utilisateur (UX), plaisir perçu, charge de travail, intensité physique]. Les résultats montrent que cet EM2I crée une intensité physique modérée à élevée (69,64 % de la fréquence cardiaque maximale), tandis que l'effort perçu est plus faible (4 sur 10 à l'échelle de Borg modifiée). De plus, il crée une UX positive, corrélée à un plaisir perçu élevé, avec une charge de travail jugée adéquate. Suite à cette première étude exploratoire, une étude interventionnelle a été menée (Béraud-Peigné et al., 2024) auprès de sujets similaires (âge moyen = 70 ans, MMSE moyen = 29/30), comparant les effets d'un programme de trois mois (2 séances par semaine d'une heure) d'EM2I à ceux d'un programme d'entraînement physique (marche et renforcement musculaire). Les résultats indiquent que le groupe EM2I a bénéficié d'une amélioration comparable dans un large éventail de capacités physiques et motrices (i.e., force musculaire du bas du corps, souplesse, équilibre, endurance). En revanche, la progression a été plus importante pour le groupe EM2I concernant la mémoire de travail visuospatiale (p = 0,01, η^2 = 0,04) évaluée à l'aide du test de Corsi [une des dimensions de l'échelle de mémoire de Wechsler (1997)], l'inhibition (p = 0,01, η^2 = 0,03), mesurée par le test de Stroop (1935) et sur l'interférence cognitive en DT, par rapport à l'entraînement physique. De plus, le plaisir perçu était significativement plus élevé pour le groupe EM2I que pour le groupe ayant suivi le programme conventionnel.

Cette étude a fait l'objet d'une publication et est disponible en Annexe 3.

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2024). **The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults.** *GeroScience, 46*(2), 1825-1841. Doi: 10.1007/s11357-023-00952-w

Ces premières études montrent des résultats encourageant l'utilisation des EM2I auprès de personnes âgées. L'expérience globale (UX, plaisir perçu, charge de travail, intensité physique) semble adaptée et pertinente, mais il apparaît essentiel de mettre ces résultats en perspective de ceux obtenus via des exergames commerciaux pour en évaluer la réelle plus-value. De plus, les effets d'un programme d'EM2I doivent être confirmés par de nouvelles études, intégrant aussi bien un groupe contrôle que des mesures de rétention, et comparant ce type d'exergames à d'autres modalités (e.g., activités motrices et cognitives complexes naturelles, exergames commerciaux, jeux vidéo).

Synthèse du chapitre 4

Ce chapitre propose un cadre méthodologique et empirique pour concevoir les entraînements combinés et comprendre leurs effets sur les capacités physiques, motrices, cognitives et de DT des personnes âgées. Il distingue leurs différentes formes selon plusieurs dimensions (temporalité, nature des stimulation, environnement, aspect social).

Globalement, les méta-analyses mettent en évidence des effets positifs mais modestes de l'entraînement combiné sur la cognition ainsi que sur plusieurs paramètres physiques et moteurs, bien que les résultats demeurent hétérogènes. La temporalité apparaît déterminante : l'entraînement simultané tend à être plus efficient, sans nuire à la composante physique. Au sein de cette modalité, la distinction entre entraînement incorporé et additionnel ouvre de nouvelles perspectives, quelques données suggérant un avantage de l'incorporé, mais les preuves restent limitées. Le choix de l'environnement constitue également un facteur à prendre en compte. Les contextes naturels sont accessibles et riches sur le plan social, tandis que les environnements virtuels favorisent l'immersion, mais posent des défis d'accessibilité. Les exergames commerciaux, bien qu'attrayants et motivants, présentent une efficacité variable, souvent limitée par le niveau d'intensité physique ou la complexité motrice qu'ils proposent. Les EM2I pourraient, quant à eux, combiner intensité, complexité motrice, sollicitation cognitive et interactions sociales.

Enfin, le chapitre souligne plusieurs manques méthodologiques et insiste sur la nécessité de futures recherches rigoureuses, questionnant non seulement l'efficacité des entraînements combinés par rapport aux modalités physique et cognitive isolées, mais aussi les formats simultanés et séquentiels, incorporés et additionnels, ainsi que l'influence de l'environnement et des différents programmes proposés (AM2C, EM2I, exergames commerciaux).

PROBLÉMATIQUE

Le vieillissement de la population s'accompagne d'un déclin progressif des capacités physiques, motrices, cognitives et de DT, ce qui accroît le risque de perte d'autonomie. Dans ce contexte, la recherche d'interventions préventives efficaces constitue une priorité. Parmi les approches étudiées, les entraînements combinés (cognitif, physique et/ou moteur), et plus particulièrement simultanés suscitent un intérêt croissant en raison de leur potentiel synergique (Fissler et al., 2013). Les exergames comptent parmi les approches les plus utilisées (Teraz et al., 2022) étant donné leur caractère ludique et la richesse de l'entraînement qu'ils proposent. Toutefois, plusieurs limites méthodologiques freinent la compréhension et l'optimisation de leurs effets.

Avant d'interroger directement l'efficacité des programmes, il est nécessaire de repenser la question de l'évaluation. Les tests cognitifs traditionnels utilisés dans les études interventionnelles présentent un manque de valeur écologique et de sensibilité, tandis que les tâches motrices mobilisées pour la DT sont souvent trop simples pour refléter la complexité des situations quotidiennes. Ce constat a motivé le développement de nouveaux tests (études 1 et 2), constituant une étape préalable indispensable pour mieux analyser les effets des programmes d'entraînement.

Le cœur de cette thèse s'articule ensuite autour des trois axes majeurs : l'expérience globale des participants vis-à-vis des exergames, l'efficacité comparative des modalités d'entraînement simultané et la durabilité des effets. **Dans quelle mesure l'entraînement combiné simultané, notamment par exergames, produit une expérience globale positive et adaptée pour les personnes âgées en bonne santé, générant des effets multidimensionnels et durables, évalués par des tests classiques et de nouveaux tests, supérieurs à ceux d'entraînements isolés (physique, cognitif) ?**

Plus particulièrement, le questionnement de cette thèse se décompose en trois composantes.

Les exergames procurent-ils une expérience globale adaptée et positive ? Existe-t-il des divergences sur cette expérience globale entre les différents types d'exergames ?

Avant d'évaluer et de comparer les effets de programmes d'entraînement innovants tels que les exergames, il apparaît indispensable d'examiner l'expérience globale des participants (expérience utilisateur, plaisir, charge de travail, intensités physique et cognitive), celle-ci conditionnant la compliance et l'efficacité des interventions.

L'entraînement simultané est-il plus efficace que les entraînements centrés sur une composante (physique, cognitive) ? Et selon quelles modalités est-il le plus pertinent ?

La littérature sur les entraînements combinés rapporte des bénéfices cognitifs modestes, sans avantage clair par rapport à l'entraînement cognitif seul (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020). En comparaison avec l'entraînement physique, les résultats apparaissent contrastés : certaines méta-analyses mettant en évidence des effets supérieurs (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Zhu et al., 2016) tandis que celle de Guo et al. (2020) ne montre pas de différence. Pourtant, le modèle de facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013) suppose une supériorité de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements physique et cognitif, mais cette hypothèse théorique reste à confirmer empiriquement. En outre, si les études existantes s'intéressent généralement aux effets cognitifs, elles intègrent rarement de manière conjointe les capacités cognitives, physiques, motrices et de DT. Pourtant, une telle approche globale apparaît essentielle pour saisir pleinement les mécanismes et l'ampleur des effets des entraînements combinés. Enfin, l'influence des modalités spécifiques, telles que la nature du lien entre la tâche motrice et cognitive (incorporée vs additionnelle, Herold et al., 2018) ou l'environnement (naturel vs virtuel), est encore peu étudiée.

Dans quelle mesure les bénéfices des entraînements se maintiennent-ils au-delà de la période d'intervention ?

La question du maintien des bénéfices au-delà de la période d'entraînement constitue un enjeu central tant pour juger de l'efficacité réelle des programmes que pour envisager leur application dans des stratégies de prévention à long terme. Or, les données disponibles restent rares et méthodologiquement limitées.

Cette thèse se distingue par son protocole expérimental. L'étude principale comprend sept groupes, incluant un groupe contrôle passif mais également deux groupes contrôles actifs (entraînement physique, entraînement cognitif), afin de comprendre les effets spécifiques de l'entraînement simultané. Ce design est rare dans la littérature, alors qu'il est indispensable pour déterminer si les bénéfices de l'entraînement simultané dépassent réellement ceux des interventions centrées sur une modalité. De plus, cette thèse élargit le modèle proposé par Herold et al. (2018), en considérant que l'entraînement incorporé n'est pas une entité homogène : ses effets peuvent varier selon différentes modalités qui le composent. Par une approche intégrée et multidimensionnelle, elle prend en compte les effets cognitifs, physiques, moteurs et de DT, évalués à court terme et en rétention, afin d'orienter la conception de stratégies de prévention adaptées aux personnes âgées en bonne santé. Enfin, ce travail se distingue par

le développement d'outils d'évaluation et par l'attention portée à l'expérience globale des participants vis-à-vis des exergames, éléments clés pour comprendre l'efficacité et la compliance aux interventions.

PARTIE 2

Contribution

ÉTUDE 1 – APPROCHE ÉCOLOGIQUE DU VIEILLISSEMENT COGNITIVO-MOTEUR : CONTRIBUTION DE NOUVEAUX TESTS PSYCHOMÉTRIQUES NUMÉRIQUES

1. OBJECTIFS

Cette étude a pour objectif 1) d'évaluer la capacité de nouveaux tests cognitifs à détecter les effets de l'âge et 2) d'examiner leur validité convergente[1], dans une perspective d'intégration de ces nouveaux tests pour enrichir la batterie des études 4 et 5 de cette thèse.

Les recherches actuelles se concentrent sur la conception de programmes d'entraînement physique et/ou cognitif préventifs efficaces pour améliorer la santé des personnes âgées (e.g., Adcock, Fankhauser, et al., 2020 ; Rahe et al., 2015 ; Tsai et al., 2017). Leur évaluation est essentielle, tant pour mesurer leurs effets que pour optimiser leur efficacité. Il est également nécessaire de concevoir des tests plus proches des exigences de la vie quotidienne, afin d'identifier la présence ou non de transferts dans des contextes écologiques. En effet, les personnes âgées doivent fréquemment mobiliser leurs capacités cognitives tout en réalisant des actions physiques (e.g., cuisiner, éviter des obstacles en marchant, réagir rapidement à une situation). Plusieurs facteurs non cognitifs, notamment le fonctionnement moteur, peuvent influencer le lien entre la performance aux tests et celle observée dans la vie quotidienne (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). Pourtant, la majorité des recherches portant sur les effets des entraînements sur le vieillissement cognitif s'appuie uniquement sur des tests de référence utilisés depuis plusieurs décennies (e.g., Stroop, TMT, Test de Corsi), dont la valeur écologique est limitée. Comme détaillé dans la partie 2.1.1 du chapitre 2 du cadre théorique, ces tests présentent en outre plusieurs limites (e.g., variabilité humaine, imprécisions, manque de randomisation). Parallèlement, certains auteurs, notamment Guo et al. (2020) suggèrent que l'absence d'effet constatée dans certaines méta-analyses comparant l'entraînement combiné aux entraînements physique ou cognitif pourrait s'expliquer par les limites méthodologiques des outils de mesure utilisés. Le recours à de nouvelles

[1] La validité convergente est une forme de validité de construit qui évalue dans quelle mesure un test est corrélé avec d'autres tests évaluant le même concept ou des concepts proches. Elle permet de vérifier que l'outil utilisé mesure effectivement le construit qu'il prétend évaluer. Si deux outils différents visent à évaluer un même construit, comme l'inhibition, leurs résultats devraient converger, c'est-à-dire présenter des corrélations élevées. Plus cette corrélation est forte, plus la validité convergente de l'outil est considérée comme bonne.

technologies pourrait surpasser ces contraintes, en offrant une évaluation plus précise et efficace que les versions papier de ces tests classiques (Sternin et al., 2019).

Les Dispositifs Lumineux Interactifs (DLI), tels que *BlazePod*, *Fitlight* ou *Witty SEM* (*Microgate*) présentent des atouts similaires aux tests informatisés (e.g., automatisation, précision, objectivité, moins de biais d'administration, adaptation à la performance) et pourraient permettre de lever certaines limites associées aux interfaces informatiques parfois jugées contre-intuitives ou intimidantes pour les personnes âgées (voir partie 2.1.1 du chapitre 2 du cadre théorique). Le système *Witty SEM*, composé de lumières programmables en différentes couleurs et formes, est actuellement utilisé comme signal de départ ou test d'agilité principalement chez les athlètes (plus de détails dans la partie 2.2.1 du chapitre 2 du cadre théorique). Bien qu'il puisse également être employé pour évaluer et entraîner les fonctions cognitives (Gonzalo-Skok et al., 2015 ; Horníková, 2023 ; Horníková et al., 2021), son application dans l'étude des effets du vieillissement cognitif reste relativement peu explorée. Pourtant, les DLI pourraient être utilisés pour créer des tests qui soient i) cognitifs avec une stimulation motrice, ii) écologiques, et iii) précis.

Le dispositif *Witty SEM* offre la possibilité de créer des tests sollicitant simultanément les compétences motrices et cognitives. Sur le plan cognitif, il est possible de choisir diverses options de tests avec différentes formes et couleurs, et donc plusieurs niveaux de difficulté cognitive. Sur le plan moteur, les participants doivent accomplir une tâche (e.g., éteindre la cible le plus rapidement possible) pour valider le traitement cognitif (e.g., trouver la bonne cible à éteindre). Ces caractéristiques le rendent particulièrement adapté pour l'évaluation d'études sur les effets d'entraînements physique et cognitif combinés via des exergames, comme cela est le cas des études 4 et 5. De plus, l'évaluation conjointe des performances motrices et cognitives présente un intérêt clinique, car elle reflète des situations réelles et permet d'identifier des risques tels que les chutes (Kearney et al., 2013 ; Montero-Odasso et al., 2012). En combinant les dimensions motrices et cognitives, le dispositif *Witty SEM* offre ainsi une approche plus écologique que les tests cognitifs classiques. Enfin, *Witty SEM* garantit une bonne précision, puisqu'il est contrôlé grâce à un chronomètre relié à un système de transmission radio, permettant un enregistrement des données en temps réel. La précision en millisecondes des latences de réponse permet ainsi d'améliorer la sensibilité des tests, faisant de *Witty SEM* un outil précieux.

Cette étude vise à répondre à un besoin d'évaluation des capacités cognitives des personnes âgées en condition plus écologique que les tests traditionnels, en comparant l'efficacité de tests conçus avec des DLI à celle des tests cognitifs traditionnels. Ces nouveaux outils pourraient permettre

d'identifier de faibles changements qui échapperaient aux méthodes conventionnelles, tout en offrant un suivi précis des évolutions cognitives liées au vieillissement sur le long terme. Ainsi, le développement et la validation de tels tests constituent une étape clé pour améliorer le suivi et la prévention du déclin cognitif chez les personnes âgées. L'objectif de cette étude est double : 1) évaluer si les tests cognitifs conçus avec des DLI sont aussi sensibles aux effets de l'âge sur la cognition que les tests traditionnels et 2) examiner la validité convergente des tests DLI. Il est émis l'hypothèse que les tests DLI révéleront des différences de performance en fonction de l'âge et que leurs scores, chez les personnes âgées, seront fortement corrélés avec ceux des tests traditionnels. Trois tests ont été conçus avec le dispositif *Witty SEM* pour évaluer quatre principales fonctions cognitives (i.e., inhibition, flexibilité cognitive, mémoire visuospatiale à court terme, mémoire visuospatiale de travail) en comparaison avec trois tests traditionnels couramment utilisés (i.e., Test de Corsi, Test de Stroop, TMT).

2. MÉTHODE

Cette étude a fait l'objet d'une publication, disponible en Annexe 4.

Béraud-Peigné, N., Perrot, A., & Maillot, P. (2023). **Wireless lighting system: A new tool for assessing cognitive functions in the elderly.** *Behavioral Sciences*, 13(11), 943. Doi: 10.3390/bs13110943

2.1. Population

Les participants potentiels ont été contactés par mail, flyer et via la liste de diffusion RISC du CNRS. Une analyse de puissance, effectuée avec le logiciel G*Power (version 3.1.9.7)[1] et basée sur le test statistique prévu initialement pour cette étude (test *t* de Student pour groupes indépendants), a révélé qu'un échantillon de 32 participants était nécessaire (α = 0,05 ; puissance = 0,80 ; taille de l'effet : d = 0,90[2]).

Tous les participants devaient répondre aux critères d'inclusion suivants : a) pratiquer moins de 2 h 30 d'activité physique par semaine, b) obtenir un score de 3 ou plus sur une échelle de santé subjective de type Likert en 5 points (1 = très mauvaise, 2 = mauvaise, 3 = normale, 4 = bonne,

[1] Les calculs de taille d'échantillon de l'ensemble des études de cette thèse ont tous été réalisés avec la même version de G*Power. Cette information ne sera pas réécrite par la suite.

[2] Comme une taille d'effet élevée était attendue [i.e., $d \geq 0,9$ (Cohen, 1988)] pour les différences entre jeunes et personnes âgées, cette valeur a été fixée à d = 0,9.

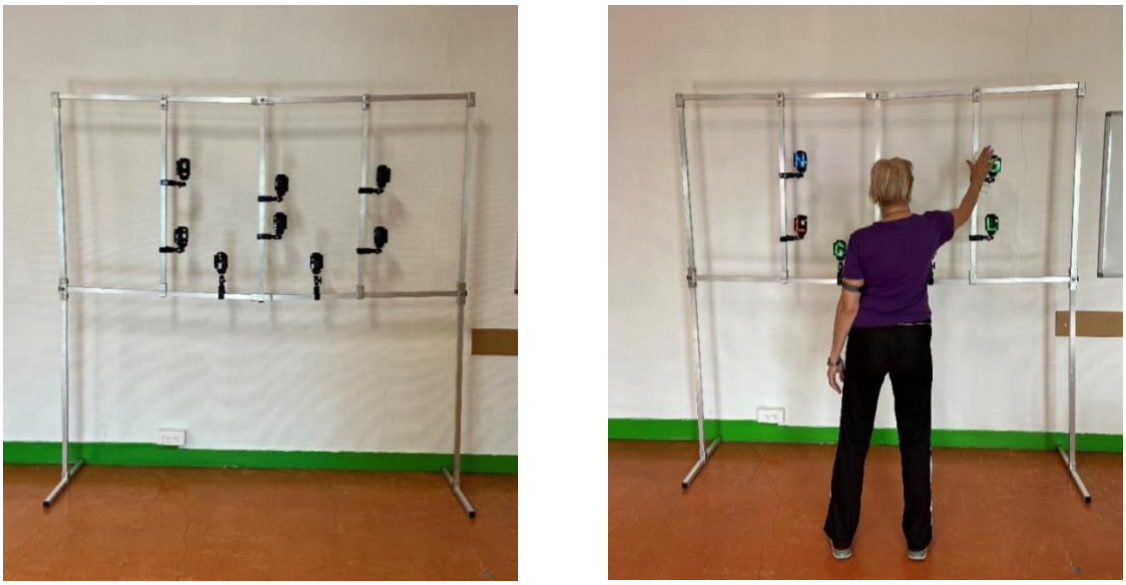
5 = excellente), c) ne pas présenter de pathologie majeure, d) avoir une vision et une audition normales ou corrigées, e) ne pas avoir de difficulté à utiliser ses épaules, f) ne pas jouer régulièrement à des jeux vidéo ou à des exergames. Les participants du groupe des adultes âgés (Âgés) devaient avoir plus de 60 ans, et ceux du groupe des jeunes adultes (Jeunes) devaient avoir entre 18 et 30 ans. Tous ont donné leur consentement éclairé écrit et n'ont pas été rémunérés pour leur participation.

2.2. Matériel et procédure

Les tests ont été réalisés individuellement, pendant une heure, dans une pièce calme du laboratoire I3SP (Institut des Sciences du Sport-Santé) de l'Université Paris-Cité (France).

2.2.1. Tests cognitifs via le Dispositif Lumineux Interactif (DLI)

Les tests sont réalisés à l'aide du dispositif *Witty SEM* comprenant huit sémaphores de 5 cm × 7 cm, chacun équipé d'une matrice LED capable d'afficher diverses couleurs et formes. Les sémaphores *Witty* sont disposés individuellement (2 au centre et 6 en périphérie) sur un support spécialement conçu à cet effet (Figure 11a).



(a) **(b)**

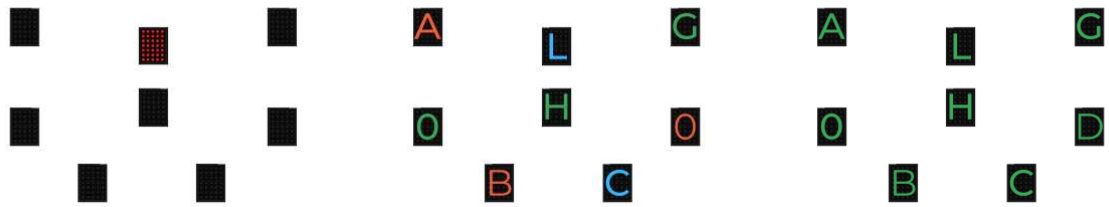
Figure 11. Dispositif Lumineux Interactif (étude 1)
(a) Structure métallique ; (b) Participant réalisant le test d'Inhibition
Note. *DLI : Dispositif Lumineux Interactif.*

Les tests sont déclenchés par une console de contrôle sans fil, fonctionnant par transmission radio. Trois tests ont été conçus. Pour chacun, le participant se place au centre du support, à une distance de bras des sémaphores. Les sémaphores intègrent un capteur de proximité qui détecte de face la

présence d'objets proches (à une distance maximale de 40 centimètres), sans contact direct avec ceux-ci. Ainsi, le participant doit approcher sa main pour éteindre le plus vite possible la lumière qui apparaît, avec sa main dominante, sans bouger les pieds. Entre chaque répétition, le participant doit replacer sa main au niveau de sa hanche. Un essai comprenant 5 exemples est effectué pour chaque test avant la réalisation complète du test. Ces tests, qui combinent des aspects moteurs et cognitifs, offrent une évaluation de la cognition moins isolée. La position debout et l'obligation de confirmer le traitement cognitif par une action motrice contribuent à fournir une évaluation écologique plus proche des contraintes de la vie quotidienne (e.g., réaliser plusieurs tâches simultanément, gérer la pression temporelle).

2.2.1.1. Le test d'Inhibition DLI

Le test est séparé en trois parties. Dans la première partie (Figure 12a), *Temps de Réaction (TR)*, le participant doit éteindre le plus rapidement possible le sémaphore qui s'allume aléatoirement en rouge. Dans la seconde partie (Figure 12b), *Temps de réaction avec de l'Inhibition Simple (IS)*, le participant doit éteindre le plus vite possible le sémaphore qui s'allume avec la lettre O, en couleur verte. Les autres sémaphores s'allument avec d'autres couleurs (i.e., bleu, rouge) associées à une lettre (i.e., A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L). Certaines lettres (hormis la lettre O) peuvent également s'allumer en vert. Dans la dernière partie (Figure 12c), *temps de réaction avec Inhibition Complexe (IC)*, le participant doit éteindre le plus vite possible le sémaphore qui s'allume avec la lettre O de couleur verte. Les autres sémaphores s'allument en vert, associés à une autre lettre (i.e., A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L). Chaque partie comprend 20 essais, chaque essai débute 1500 ms après la réponse précédente. Le temps total pour compléter chaque partie est enregistré en millisecondes. Le score d'*Inhibition* est mis en évidence en calculant la différence de temps entre les conditions IC et TR.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 12. Test d'inhibition DLI (étude 1)
(a) Partie 1 : Temps de réaction ; (b) Partie 2 : Temps de réaction avec Inhibition Simple ; (c) Partie 3 : Temps de réaction avec Inhibition Complexe
Note. *DLI : Dispositif Lumineux Interactif.*

2.2.1.2. Les tests de mémoire visuospatiale DLI

Ce test est effectué en deux parties. La première partie évalue la mémoire visuospatiale à court terme. Une séquence numérique ascendante (e.g., 1, 2, 3, 4) est présentée grâce aux sémaphores qui s'allument un par un, à raison d'un par seconde (Figure 13a–c). Lorsque tous les sémaphores affichent une croix verte (Figure 13d) à la fin de la séquence, le participant doit reproduire la séquence des chiffres dans le même ordre. La seconde partie évalue la mémoire visuospatiale de travail. Une séquence numérique descendante (e.g., 4, 3, 2, 1) est affichée de la même manière que dans la première partie, avec un sémaphore s'allumant à chaque seconde. Lorsque tous les sémaphores affichent une croix verte à la fin de la séquence, le participant doit reproduire la séquence des chiffres dans l'ordre inverse.

Dans les deux parties, les tests commencent par une séquence de deux chiffres. À chaque fois que deux tentatives sont réussies, un chiffre supplémentaire est ajouté à la série. En revanche, si deux tentatives échouent avec le même nombre de chiffres, un chiffre est retiré. Le test comprend 10 tentatives et un point est attribué pour chaque tentative correctement réalisée.

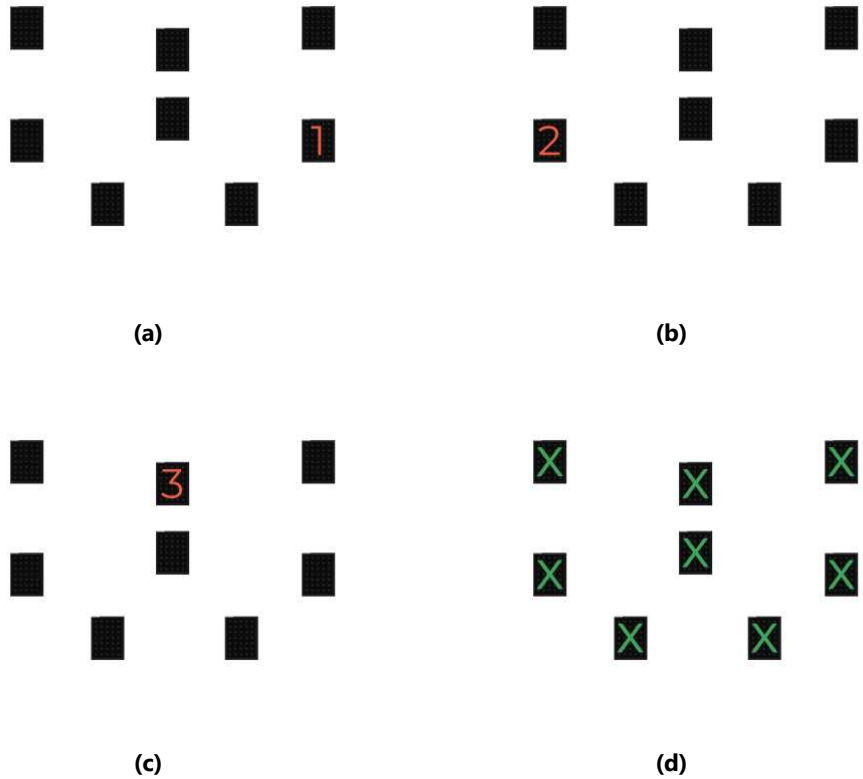


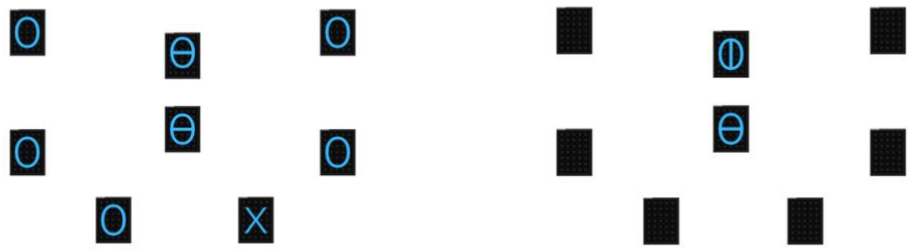
Figure 13. Tests de mémoire visuospatiale DLI (étude 1)
(a), (b), (c) Partie 1 ; (d) Partie 2
Note. *DLI : Dispositif Lumineux Interactif.*

2.2.1.3. Le test de flexibilité DLI

Deux sémaphores (A et B), placés l'un au-dessus de l'autre au centre du cadre, affichent soit le symbole « cercle avec une ligne horizontale » soit le « cercle avec une ligne verticale ». Les autres sémaphores sont disposés en cercle autour des sémaphores centraux (Figure 14a).

Le test est divisé en deux parties. Dans un premier temps, les sémaphores centraux A et B présentent simultanément le même symbole (soit un « cercle avec une ligne horizontale », soit un « cercle avec une ligne verticale »). Le participant doit mémoriser ce symbole. Parallèlement, un symbole distinct (une croix bleue) apparaît sur l'un des sémaphores périphériques, tandis qu'un cercle bleu s'affiche sur tous les autres (Figure 14a). Le participant doit également mémoriser l'emplacement de la croix. Toutes les informations restent visibles pendant 1,995 secondes.

Dans un second temps, une fois les lumières éteintes, les sémaphores centraux affichent deux options : le symbole « cercle avec une ligne horizontale » et « cercle avec une ligne verticale » (Figure 14b). Le participant doit approcher sa main du sémaphore avec le bon symbole. Puis, il doit indiquer le sémaphore périphérique où s'était affichée la croix bleue dans la première partie. Un point est attribué pour chaque tentative entièrement réussie, pour un total de 10 tentatives.



(a) **(b)**

Figure 14. Test de flexibilité DLI
(a) Partie 1 ; (b) Partie 2 (étude 1)
Note. *DLI : Dispositif Lumineux Interactif.*

2.2.2. Tests cognitifs traditionnels

2.2.2.1. Le test de Corsi

Il s'agit d'un sous-test de l'échelle de mémoire de Wechsler (Wechsler, 1997). La première partie évalue la mémoire visuospatiale à court terme. Le participant doit reproduire, dans le même ordre, une séquence de mouvements de pointage de différents cubes désignés par l'examinateur. Dans la deuxième partie, qui évalue la mémoire de travail visuospatiale, le participant doit reproduire une séquence de mouvements dans l'ordre inverse. Le nombre de cubes augmente progressivement, déterminant ainsi, dans un premier temps, *l'empan visuospatial* et, dans un second temps, l'*empan visuospatial inverse*. Pour chaque niveau, le participant bénéficie de deux essais, un point est attribué pour chaque tentative réussie. Le test se termine lorsque deux erreurs sont commises dans le même niveau.

2.2.2.2. Le test de Stroop

Ce test évalue la capacité d'inhibition (Stroop, 1935). Chaque planche contient 100 items, avec des mots de quatre couleurs (i.e., jaune, rouge, vert, bleu), répartis en 10 colonnes. La première condition, la *planche dénomination*, contient des rectangles de couleur. La seconde, la *planche lecture*, contient des mots de couleurs écrits à l'encre noire. La troisième, *planche interférence*, contient des mots de couleurs, qui sont écrits avec une couleur d'encre différente de leur signification. La condition interférente nécessite d'inhiber la lecture au profit de la tâche moins automatique de dénomination. Dans les trois conditions, le nombre de réponses correctes données en 45 secondes correspond à la mesure de la performance. La mesure du *score d'interférence* est calculée ainsi :

$$\text{Score d'interférence} = \frac{\text{Score planche interférence}}{\text{Moyenne des scores des planches dénomination et lecture}}$$

Équation 2. Score d'interférence

2.2.2.3. Le Trail Making Test

Le TMT évalue principalement la flexibilité cognitive (Reitan, 1979). La Partie A consiste à relier une série de chiffres croissants allant de 1 à 25 en sélectionnant le chiffre pertinent parmi les 25 items possibles. Dans la Partie B, le participant alterne entre deux séries, une composée de chiffres et l'autre de lettres (e.g., 1-A-2-B-3-C). Il doit réaliser cela sans lever le stylo de la feuille et le plus rapidement possible. S'il commet des erreurs, l'examinateur informe le sujet qu'il doit les rectifier. Pour les deux parties, une version d'essai contenant six items à relier est réalisée au préalable afin de s'assurer que les consignes ont bien été comprises. La flexibilité est spécifiquement mise en évidence par l'analyse de la différence de *Temps B – Temps A*, qui représente une mesure plus pure de flexibilité cognitive.

2.3. Analyse des données

Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel JASP (version 0.19.2)[1]. Les données descriptives (i.e., moyenne, écart-type, intervalle) ont été rapportées pour toutes les variables. Avant de procéder aux tests statistiques inférentiels, toutes les hypothèses pertinentes ont été vérifiées (distribution normale, homogénéité des variances des variables indépendantes). Les résultats sont fournis dans les tableaux S1 et S2, accessibles sur https://osf.io/s4k8u/. Des tests paramétriques ont été utilisés si les hypothèses étaient respectées, et des tests non paramétriques ont été employés si ces hypothèses ne l'étaient pas. Les tests de Mann–Whitney ont permis d'analyser les différences entre les groupes. Pour déterminer les relations entre les tests, les coefficients de corrélation de Spearman ou de Pearson ont été utilisés. Toutes les analyses statistiques avec une valeur $p < 0,05$ ont été considérées comme significatives. Les tailles d'effet, c'est-à-dire la corrélation bisériale par rang (r) pour le test de Mann–Whitney U, et le rho de Spearman (ρ) ou le r de Pearson ont été calculées pour étudier la puissance des résultats. Comme indiqué dans les directives de taille d'effet de Cohen (Cohen, 1988), r et ρ sont considérés comme faibles si la taille d'effet est comprise entre 0,10 et 0,30, moyennes si elle est comprise entre 0,30 et 0,50, et élevées si elle est supérieure à 0,50.

3. RÉSULTATS

3.1. Participants

Trente-trois participants ont pris part à l'étude : 15 jeunes adultes (9 femmes) et 18 personnes âgées (12 femmes). Les variables individuelles (i.e., âge, IMC, taille, santé subjective) sont indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques personnelles des participants (étude 1)

	Jeunes (n = 15)		**Âgés** (n = 18)	
	M	*ET*	*M*	*ET*
Âge (années)	23,47	2,13	71,44	5,40
IMC (kg/m^2)	21,14	3,13	24,71	2,92
Taille (cm)	169,00	10,04	165,67	10,47
Santé subjective (score)	4,27	0,46	3,83	0,51

Note. *cm : centimètre ; ET : Écart-Type ; IMC : Indice de Masse Corporelle ; kg : kilogramme ; M : Moyenne ; m : mètre ; n : nombre.*

[1] L'ensemble des données ayant été analysé avec le logiciel JASP (version 0.19.2), cette information ne sera pas réécrite pour les prochaines études.

3.2. Effets du vieillissement

Les scores des tests DLI et TRADitionnels (TRAD) pour les Jeunes et Âgés sont présentés dans le Tableau 2. Un effet plafond est observé sur le test de flexibilité DLI pour le groupe Jeunes comme l'indique l'intervalle (i.e., 10-10). Les intervalles pour tous les autres tests sont suffisants, sans signe d'effet de plancher ou de plafond.

La première étape de l'analyse des données consiste à examiner la capacité des tests DLI à discriminer les groupes Jeunes et Âgés. Il y a une différence significative entre les deux groupes sur les six mesures des tests DLI (p < 0,01 ou p < 0,001) avec des tailles d'effet importantes (r > 0,50), ainsi que sur toutes les mesures TRAD avec des tailles d'effet moyennes à élevées. Une analyse statistique n'a pas pu être réalisée pour la flexibilité des tests DLI en raison de la variance égale à 0 pour le groupe Jeunes.

3.3. Validité convergente

Dans la deuxième étape de l'analyse des données, la validité convergente des tests est évaluée en calculant les corrélations entre les tests DLI et TRAD séparément pour les groupes Jeunes et Âgés (Tableau 3).

Pour le groupe des Âgés, il y a une forte corrélation entre les deux mesures de l'inhibition, *Inhibition Complexe (DLI)* et *Planche interférence* (TRAD) (r = -0,73, IC 95 % [-0,89 ; -0,41], p < 0,001) et une corrélation modérée entre les deux autres, *score d'inhibition (DLI)* et *score d'interférence* (TRAD) (r = - 0,49, IC 95 % [-0,78 ; -0,03], p = 0,040). Il y a de fortes corrélations entre les deux mesures de flexibilité cognitive, *flexibilité (DLI)* et *Temps B – Temps A* (TRAD) (ρ = -0,63, IC 95 % [-0,85 ; -0,24], p = 0,005) et entre les deux mesures de la mémoire de travail visuospatiale, *mémoire visuospatiale de travail (DLI)* et *empan spatial inverse* (TRAD) (r = 0,67, IC 95 % [0,29 ; 0,86], p = 0,003). Aucune corrélation n'a été observée entre les deux mesures de la mémoire visuospatiale à court terme, *mémoire visuospatiale à court terme* (DLI) et *empan spatial* (TRAD) (p > 0,05).

Pour le groupe des Jeunes, aucune corrélation n'a été observée entre les mesures (p > 0,05). Une analyse statistique n'a pas pu être réalisée pour la flexibilité en raison de la variance égale à 0.

Tableau 2. Différences entre les tests DLI et TRAD entre les Jeunes et les Âgés (étude 1)

	Jeunes		Âgés				
	M (ET)	*Intervalle*	*M (ET)*	*Intervalle*	*W*	*p*	*r*
Tests DLI							
Inhibition DLI							
Temps de réaction (ms)	1926,93 (51,21)	1854,00-2026,50	2052,89 (115,73)	1841,00-2381,50	234,00	**< 0,001**	0,73
Inhibition simple (ms)	2494,47 (163,51)	2251,50-2912,00	2654,03 (335,40)	2316,00-3377,00	217,00	**0,002**	0,61
Inhibition complexe (ms)	2824,93 (259,08)	2525,50-3309,00	3237,50 (337,95)	2646,50-3737,50	224,00	**< 0,001**	0,66
Score d'inhibition (ms)	898,00 (238,28)	656,50-1318,50	1184,61 (300,06)	683,50-1623,50	213,00	**0,004**	0,58
Mémoire visuospatiale DLI							
Mémoire visuospatiale à court terme (n)	8,60 (1,12)	7-10	7,28 (0,89)	6-9	54,00	**0,002**	0,60
Mémoire visuospatiale de travail (n)	8,20 (0,94)	6-9	6,61 (0,85)	5-8	32,50	**< 0,001**	0,76
Flexibilité DLI							
Flexibilité (n)	10,00 (0,00)	10-10	7,11 (3,16)	0-10	-	**-**	-
Tests TRAD							
Corsi							
Empan visuospatial (n)	8,47 (1,96)	5-12	6,39 (1,42)	4-9	54,50	**0,003**	0,60
Empan spatial inverse (n)	8,47 (2,10)	5-12	5,56 (1,85)	3-8	43,00	**< 0,001**	0,68
Stroop							
Planche dénomination (n)	122,00 (17,30)	95-152	106,00 (22,76)	63-160	61,50	**0,015**	0,52
Planche lecture (n)	83,57 (13,96)	60-113	71,89 (25,18)	33-150	70,50	**0,036**	0,44
Planche interférence (n)	63,86 (13,94)	40-98	45,94 (27,03)	18-139	38,50	**< 0,001**	0,69
Score d'interférence (n)	0,62 (0,14)	0,47-1,03	0,50 (0,17)	0,24-1,02	49,00	**0,003**	0,61
TMT							
Temps A (s)	14,15 (4,09)	10,33-24,33	31,78 (13,98)	15,01-62,06	255,00	**< 0,001**	0,89
Temps B (s)	33,32 (9,57)	21,05-54,75	93,04 (62,95)	32,73-227,99	245,00	**< 0,001**	0,81
Temps B - Temps A (s)	19,16 (9,09)	0,73-35,57	61,27 (51,94)	14,91-167,90	212,00	**0,005**	0,57

Note. *DLI : Dispositif Lumineux Interactif ; ET : Écart-Type ; M : Moyenne ; ms : milliseconde ; n : nombre ; s : seconde ; TMT : Trail Making Test ; TRAD : traditionnel.*

Tableau 3. Validité convergente entre les tests DLI et TRAD (étude 1)

DLI / TRAD		Inhibition complexe		Score d'inhibition		Flexibilité		Mémoire visuospatiale à court terme		Mémoire visuospatiale de travail	
		Jeunes	**Âgés**	**Jeunes**	**Âgés**	**Jeunes**	**Âgés**	**Jeunes**	**Âgés**	**Jeunes**	**Âgés**
Planche interférence	r / ρ	-0,41	**-0,73**								
	IC 95 %	-0,77 – 0,16	**-0,89 – -0,41**								
	p	0,149	**< 0,001**								
Score d'interférence	r / ρ			-0,27	**-0,49**						
	IC 95 %			-0,70 – -0,30	**-0,78 – -0,03**						
	p			0,341	**0,040**						
Temps B-A	r / ρ					X	**-0,63**				
	IC 95 %					X	**-0,85 – -0,24**				
	p					X	**0,005**				
Empan spatial	r / ρ							0,45	0,05		
	IC 95 %							-0,08 – 0,78	-0,43 – 0,50		
	p							0,093	0,847		
Empan spatial inverse	r / ρ									0,46	**0,67**
	IC 95 %									-0,07 – 0,78	**0,29 – 0,86**
	p									0,087	**0,002**

Note. *TRAD : Traditionnel ; DLI : Dispositif Lumineux Interactif ; X : analyse statistique impossible à réaliser ; IC 95 % : Intervalle de Confiance à 95 % pour r/ρ.*

4. DISCUSSION

Le premier objectif de cette étude pilote était de vérifier si les tests cognitifs conçus avec un Dispositif Interactif Lumineux (DLI) étaient sensibles aux effets de l'âge de la même manière que les tests traditionnels. Des différences significatives de performance sont constatées entre les jeunes et les âgés pour les tests traditionnels, confirmant les résultats déjà présents dans la littérature pour le test de Corsi (Rowe et al., 2008), de Stroop (Cohn et al., 1984) et le TMT (Goul & Brown, 1970). Contrairement à l'étude de Cohn et al. (1984), une différence significative est observée pour la planche lecture du test de Stroop dans cette étude, bien que la taille d'effet de cette différence soit plus faible (r = 0,44) que pour les autres planches (r = 0,52 à 0,69). De plus, plusieurs tests DLI permettent d'observer des différences significatives entre les jeunes et les personnes âgées (i.e., inhibition, mémoire visuospatiale à court terme et mémoire de travail) avec des tailles d'effet modérées (r = 0,58 à 0,76). Cependant, une analyse statistique n'a pas pu être réalisée pour le score de flexibilité DLI en raison d'un écart-type nul (lié à l'effet plafond) pour le groupe Jeunes. Cela peut s'expliquer par le fait que la performance soit enregistrée avec un score plutôt qu'un temps. Un temps, même s'il n'évite pas totalement un effet plafond ou plancher, pourrait permettre de discriminer davantage les jeunes entre eux. De plus, dans cette expérience, les tests DLI sont programmés pour ne pas s'adapter aux capacités individuelles, afin de pouvoir comparer les scores à leurs équivalents traditionnels. À l'avenir, si cet outil devait être utilisé pour évaluer les fonctions cognitives auprès de jeunes adultes, les tests devraient être adaptatifs ou initialement plus complexes.

Le deuxième objectif de cette étude était d'examiner la validité convergente des tests DLI, en vérifiant s'ils mesuraient effectivement les fonctions cognitives initialement ciblées. Pour le groupe Âgés, les corrélations sont modérées à élevées pour quatre fonctions cognitives, à l'exception de la mémoire visuospatiale à court terme (p > 0,05). Les intervalles de confiance à 95 % du coefficient de corrélation sont cependant larges (jusqu'à 0,75 pour les corrélations entre le score d'interférence et celui d'inhibition) traduisant une variabilité importante des données. Une augmentation de la taille de l'échantillon pourrait permettre d'obtenir des estimations plus stables, tout en reflétant l'hétérogénéité inter-individuelle naturelle du vieillissement cognitif. Néanmoins, ces intervalles ne contiennent jamais la valeur 0, ce qui confirme la significativité statistique des corrélations observées et renforce leur interprétation. Ainsi, les systèmes DLI semblent permettre d'évaluer les fonctions ciblées. Il a été choisi de segmenter les tests DLI en différentes fonctions cognitives (e.g., flexibilité cognitive, inhibition), suivant ainsi l'approche couramment adoptée pour les tests cognitifs traditionnels. Cette classification permet de structurer l'analyse et de comparer les tests DLI avec les tests de référence. Toutefois, il est

important de souligner que les fonctions cognitives ne sont jamais totalement isolées, y compris dans les tests classiques. Chacun cible une fonction cognitive spécifique, tout en tenant compte du fait que d'autres processus cognitifs interviennent également. Cette interdépendance est d'autant plus marquée lorsqu'une composante motrice est introduite, comme c'est le cas dans les tests DLI. Cela complexifie davantage l'interprétation des résultats, car il est difficile de déterminer dans quelle mesure les performances reflètent une fonction cognitive isolée, ou bien le produit d'un ensemble de processus cognitifs et moteurs interconnectés. Ainsi, bien que la segmentation par fonction cognitive utilisée apporte une lisibilité méthodologique, elle représente une limite à prendre en compte dans l'analyse et l'interprétation des effets observés.

Comme le souligne la revue de Zygouris et Tsolaki (2015), l'équivalence entre les tests papier-crayon et leurs adaptations informatisées ne peut être que présumée. Des variations dans les instructions, la présentation des stimuli et les méthodes de réponse peuvent affecter les résultats, en particulier chez les personnes âgées. Dans cette étude, la différence majeure réside dans le fait que la réalisation motrice est essentielle à la réussite des tests cognitifs. Cette exigence peut ainsi réduire la force des corrélations entre les nouveaux tests et les tests traditionnels. De plus, bien que critiqués pour leur manque de précision, les tests traditionnels sont utilisés comme référence pour évaluer la validité convergente, ce qui peut également justifier la part de variance non expliquée. Actuellement, ces tests demeurent la norme de référence largement reconnue pour l'évaluation cognitive des personnes âgées. Concernant le groupe Jeunes, aucune corrélation entre les mesures n'est observée. Chez cette population, il faudrait augmenter le nombre et la complexité des stimuli, accélérer leur apparition, et intensifier les contraintes motrices et cognitives pour mieux solliciter leurs capacités.

Étant donné que les performances motrices et cognitives sont fortement liées chez les personnes âgées (Clouston et al., 2013), il est nécessaire de développer des tests reflétant davantage les défis de la vie quotidienne, plutôt qu'une tâche cognitive isolée. Puisque les tests traditionnels manquent de validité écologique, les tests DLI apparaissent comme une alternative prometteuse. Par ailleurs, ces nouveaux tests ne doivent pas être considérés comme équivalents aux tests traditionnels mais comme des tests plus écologiques, combinant stimulation physique et évaluation cognitive (e.g., éteindre la bonne cible aussi rapidement que possible). Même si les configurations DLI ne reproduisent pas directement les situations de la vie quotidienne, la tâche motrice supplémentaire rend l'évaluation cognitive moins isolée et donc plus proche des exigences multidimensionnelles de la vie quotidienne. La valeur écologique, en particulier la vérisimilitude (i.e., degré selon lequel un test reproduit des situations similaires aux contextes quotidiens, en termes de tâches, d'interactions et de contraintes

environnementales (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003 ; Franzen & Wilhelm, 1996), pourrait être améliorée en ajoutant des tâches motrices plus complexes, telles que monter des marches. Cela permettrait aux tests de mieux capturer l'essence des compétences cognitives quotidiennes (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). De plus, de nouveaux tests pourraient être développés avec cet outil, incluant par exemple de la coordination, capacité rarement évaluée chez les personnes âgées.

Outre les limites précédemment évoquées, la principale limite de cette étude concerne l'impossibilité d'effectuer des statistiques inférentielles pour tester les différences entre les deux groupes pour le test de flexibilité DLI. De plus, les résultats sont comparés uniquement pour trois tests cognitifs, alors que d'autres tests pourraient être créés pour évaluer la planification, l'attention ou la mémoire à long terme. Il serait également intéressant de tester un panel plus large de la population âgée pour obtenir des données normatives et des standards psychométriques.

Cette première étude pilote montre des résultats encourageants. Les tests DLI pourraient être comparés à d'autres tests cognitifs, en particulier des tests écologiques, tels que certains de la batterie *Behavioral Assessment of the Dysexecutive Syndrome* (BADS, Norris & Tate, 2000). Les tests DLI semblent valides pour évaluer les fonctions cognitives (flexibilité, mémoire à court terme et de travail visuospatiale, inhibition) dans une situation motrice chez les personnes âgées, et sont également sensibles aux effets de l'âge. Ils peuvent évaluer la cognition des personnes âgées, rendant l'évaluation cognitive moins isolée et donc plus écologique. La valeur écologique peut néanmoins être améliorée. À la suite de cette étude, le test d'inhibition DLI sera conservé et intégré au protocole d'évaluation des études 4 et 5. Cette sélection s'appuie sur les résultats démontrant que ce test présente la plus forte validité convergente (r = 0,73) avec son équivalent traditionnel (test de Stroop) tout en étant sensible aux effets de l'âge. Ce test apparaît comme le plus pertinent pour poursuivre l'évaluation des fonctions cognitives dans un cadre écologique. Ainsi, cette étape s'inscrit dans une démarche progressive, visant à construire un protocole d'évaluation à la fois sensible, valide et applicable en conditions plus écologiques dans le cadre des études ultérieures de cette thèse.

ÉTUDE 2 : EFFET DU MODE DE GÉNÉRATION DE LA TÂCHE COGNITIVE ET DE L'ÂGE SUR L'EFFET DE DOUBLE-TÂCHE COGNITIF ET MOTEUR

1. OBJECTIFS

Cette étude a pour objectif 1) d'étudier la capacité de nouveaux tests de DT cognitivo-motrice à détecter les effets de l'âge et 2) d'examiner l'impact du mode de génération de la tâche cognitive sur l'effet de la double-tâche (DTE, *Dual-Task Effect*), dans une perspective d'intégration de ces nouveaux tests pour enrichir la batterie des études 4 et 5 de cette thèse.

Jusqu'à présent, les évaluations des capacités de DT cognitivo-motrices se sont principalement appuyées sur des tâches motrices simples, comme la marche ou l'équilibre (Grosboillot et al., 2024 ; K. Z. H. Li et al., 2018 ; Plummer et al., 2015), associées à diverses tâches cognitives, mettant en évidence des interférences cognitivo-motrices (Fallahtafti et al., 2021). Cependant, la nature répétitive et peu exigeante de ces tâches motrices simples pourrait ne mobiliser qu'une part restreinte des ressources attentionnelles, ce qui peut limiter la sensibilité des mesures des DTE. Par ailleurs, les DTE cognitifs générés par les DT cognitivo-motrices ont été moins étudiés comparativement aux DTE moteurs. Ainsi, cette étude vise à contribuer à l'évolution des tests de DT en explorant de nouvelles combinaisons motrices et cognitives selon deux axes. D'une part, l'ajout d'une tâche plus complexe pourrait permettre de créer une DT exigeante et de se rapprocher des exigences de la vie quotidienne. D'autre part, l'effet du mode de génération des tâches cognitives (autogénérée vs induite par l'environnement) sur les performances en DT est un aspect encore peu exploré, malgré des données suggérant que les tâches autogénérées pourraient mobiliser des ressources attentionnelles distinctes pouvant influencer différemment les interférences (Al-Yahya et al., 2011). Les recherches antérieures montrent en effet que les tâches autogénérées pourraient perturber davantage la marche en DT en raison de leur sollicitation de réseaux de haut niveau partagés avec ceux du contrôle de la marche, contrairement aux tâches induites par l'environnement. Toutefois, peu d'études ont comparé ces deux modes de génération de tâches dans des contextes de DT, d'autant plus avec des tâches motrices plus complexes.

Dans cette étude, deux tests de DT sont conçus, comportant la même tâche motrice et deux tâches cognitives différentes (i.e., autogénérée, induite par l'environnement). L'objectif de l'étude consiste à déterminer l'effet de l'âge sur les DTE cognitif et moteur en fonction du type de tâche

cognitive (autogénérée, induite par l'environnement). Comme prérequis, il est examiné si un effet de l'âge est observable sur les performances en ST et en DT, ainsi que sur le DTE. Al-Yahya et al. (2011) ont émis l'hypothèse que les tâches cognitives autogénérées perturbent davantage les performances de marche en DT que les tâches induites par l'environnement. Ainsi, il est prédit que la tâche autogénérée, comparée à la tâche induite par l'environnement, engendre davantage d'interférences cognitives et motrices.

2. MÉTHODE

Cette étude a fait l'objet d'une publication présentée en Annexe 5.

Béraud-Peigné N., Perrot, A., Maquestiaux, F., & Maillot, P. (2025). **Understanding Age-Related Interference in Cognitive-Motor Dual-Task Performance: A Novel Approach.** *Experimental Aging Research*, 1-17. Doi: 10.1080/0361073X.2025.2528580.

2.1. Population

Les mêmes participants ayant réalisé les études 1 et 2, les critères d'inclusion sont donc identiques (voir partie 2.1 de l'étude 1). Une participante du groupe Âgés a été exclue en raison d'un problème d'audition qui ne lui a pas permis de réaliser la totalité des tests de l'étude 2. L'analyse de puissance basée sur le test statistique prévu pour cette étude (ANOVA mixte 2 × 2, avec un facteur intra-sujets et un facteur inter-sujets) a révélé qu'un échantillon de 30 participants était nécessaire (α = 0,05 ; puissance = 0,80 ; taille d'effet : η^2 = 0,07).

2.2. Matériel et procédure

Les tests réalisés suivent les recommandations des critères méthodologiques pour la conception des études sur la DT. Ces recommandations soulignent la nécessité de mesurer à la fois la performance de la tâche principale et celle de la tâche concurrente, aussi bien en ST qu'en DT (Boisgontier et al., 2013). Tous les tests en ST et en DT, décrits dans la Figure 15, ont été réalisés pendant une minute chacun. Ils ont été effectués dans une pièce calme au laboratoire I3SP, à Paris.

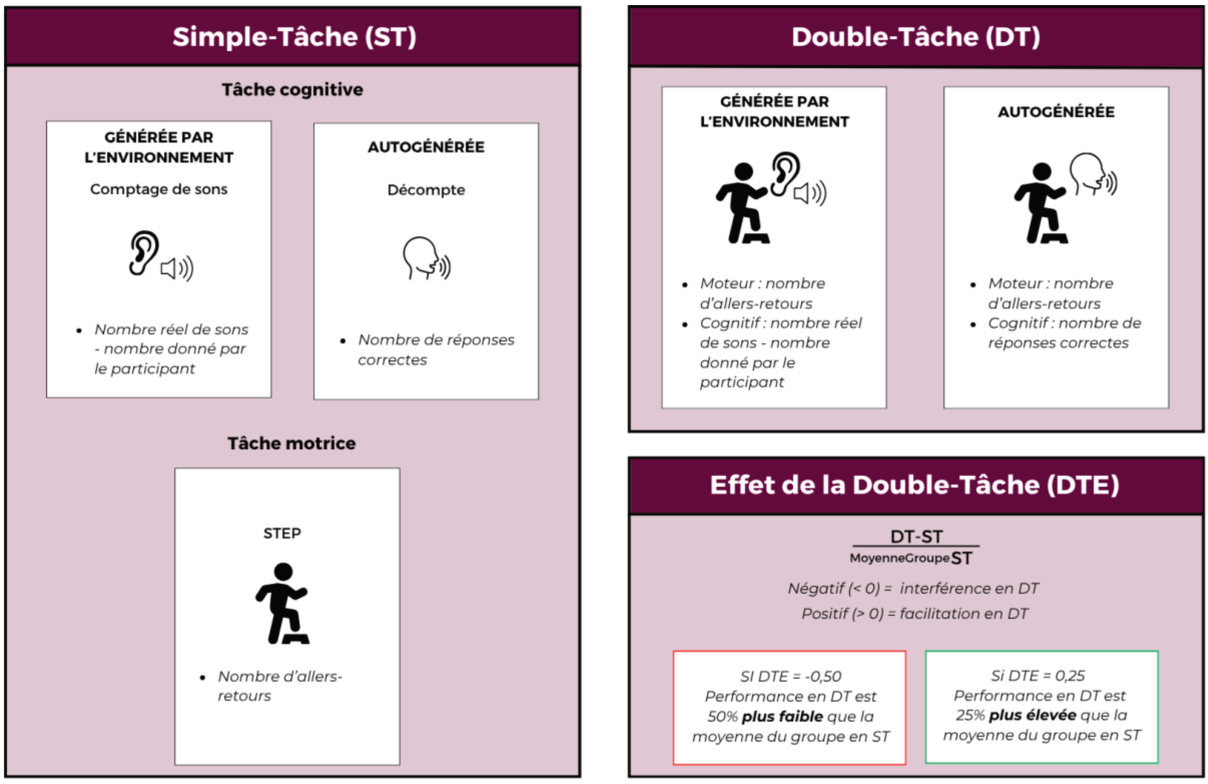


Figure 15. Description des ST, DT et DTE (étude 2)

Note. *DT : Double-Tâche ; DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche) ; ST : Simple-Tâche.*

2.2.1. Simple-Tâches (ST)

Trois tests ST sont réalisés : un test moteur et deux tests cognitifs (les modalités des tests cognitifs sont décrites dans la Figure 16).

Tâche cognitive	Mode de génération	Code central	Modalité d'entrée	Modalité de sortie
Décompte	Autogénéré	Verbal	-	Vocale
Comptage sonore	Généré par l'environnement	Verbal	Sonore	-

Figure 16. Modalités des tâches cognitives (étude 2)

Test moteur ST - tâche de STEP. Le participant doit monter et descendre d'un STEP (15 centimètres de hauteur) à un rythme confortable, en posant alternativement ses deux pieds sur le STEP, puis au sol. Le nombre d'allers-retours est comptabilisé (*score moteur ST*).

Test cognitif ST environnement - tâche de comptage sonore. Le participant doit compter le nombre de sons aigus intégrés dans un flux équiprobable de sons « aigus » et « graves ». Le son aigu est d'une tonalité de 1 800 Hz, et le son grave de 400 Hz. Suivant Chauvel et al. (2012), la cadence de présentation

des sons est de 1 200 ms, chaque son durant 15 ms. Ce flux sonore est généré par le logiciel E-Prime 2.0 (Schneider et al., 2002). À la fin de la session d'écoute, le participant doit indiquer le nombre de sons aigus entendus. La performance est mesurée par la différence entre le nombre réel de sons aigus et le nombre indiqué par le participant (*score cognitif ST environnement*).

Test cognitif ST autogénéré - tâche de décompte. Le participant doit compter à rebours par paliers de sept, en commençant à 286, à son propre rythme. En cas d'erreur, l'examinateur la signale et le participant doit la corriger. Le nombre de réponses correctes est relevé (*score cognitif ST autogénérée*).

2.2.2. Double-tâches

Deux tests DT cognitivo-moteurs sont effectués. Il n'y a pas de priorité assignée à une tâche, cette approche étant la plus courante dans les paradigmes DT impliquant la marche, car elle est considérée comme plus écologique (Beauchet & Berrut, 2006). De plus, cette instruction permet de déterminer la stratégie adoptée par le participant (préférence pour la tâche 1 ou la tâche 2).

DT environnement. Le participant doit réaliser simultanément la tâche STEP et la tâche de comptage sonore. Les performances sur la tâche motrice (*score moteur DT environnement*) et sur la tâche cognitive (*score cognitif DT environnement*) sont enregistrées.

DT autogénérée. Le participant doit effectuer simultanément la tâche STEP et la tâche de décompte (le nombre initial est 565). Les performances sur la tâche motrice (*score moteur DT autogénéré*) et sur la tâche cognitive (*score cognitif DT autogénéré*) sont enregistrées.

2.2.3. Effet de Double-Tâche

L'effet de double-tâche (*Dual Task Effect,* DTE) est utilisé pour calculer l'interaction entre deux tâches. Cet effet peut être bidirectionnel, exprimé soit comme un coût, soit comme un gain. Le DTE est positif si la performance en DT est meilleure qu'en ST, et négatif si la performance en DT est inférieure à celle en ST. Habituellement, le DTE correspond à la différence entre la performance en DT et la performance en ST, le tout divisé par la performance en ST (voir Équation 1) (Fallahtafti et al., 2021 ; Gallou-Guyot et al., 2025 ; K. Z. H. Li et al., 2018).

Néanmoins, cette formule ne peut pas être utilisée dans cette étude étant donné que le résultat obtenu par les participants sur certaines tâches cognitives en ST peut être égal à 0. Ainsi, la formule suivante, qui permet également de calculer un coût proportionnel, est utilisée :

$$DTE = \frac{DT - ST}{MoyenneGroupeST}$$

Équation 3. Effet de la double-tâche (calcul adapté)

Note. *DT : Double-Tâche ; DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche) ; ST : Simple-Tâche.*

2.3. Analyse des données

Les données descriptives (i.e., moyenne, écart-type) sont rapportées pour toutes les variables. Pour comparer les résultats des tests ST, DT et DTE entre les groupes Jeunes et Âgés, des tests *t* de Student indépendants ont été utilisés. Pour le DTE, des ANOVA mixtes ont testé les interactions : 1) entre la nature des tâches cognitives (autogénérée - décompte, induite par l'environnement - comptage sonore) et les groupes d'âge (Jeunes, Âgés) ; 2) entre la nature de l'interférence (DTE cognitif, DTE moteur) et les groupes d'âge (Jeunes, Âgés). L'égalité des variance a été vérifiée avec le test de Levene. Lorsque les analyses ANOVA démontrent un effet d'interaction, des tests post hoc avec correction de Holm sont effectués. Les tailles d'effet sont calculées pour évaluer la puissance des résultats : êta au carré (η^2) pour l'ANOVA et *d* de Cohen (*d*) pour le test *t*. Selon les directives de Cohen (1988), η^2 est faible entre 0,01 et 0,06, moyen entre 0,06 et 0,14, et grand au-delà de 0,14. Pour *d* de Cohen, l'effet est faible entre 0,20 et 0,50, moyen entre 0,50 et 0,80, et grand au-delà de 0,80.

3. RÉSULTATS

3.1. Participants

Trente-deux sujets ont participé à l'étude : 15 jeunes adultes (9 femmes) et 17 adultes âgés (11 femmes). Les variables individuelles (i.e., âge, IMC, taille, santé subjective) sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques personnelles des participants (étude 2)

	Jeunes (*n* = 15)		**Âgés** (*n* = 17)	
	M	*ET*	*M*	*ET*
Âge (années)	23,47	2,13	71,06	5,31
IMC (kg/m^2)	21,14	3,13	24,63	3,00
Santé subjective (score)	4,27	0,46	3,88	0,49

Note. *ET : Écart-Type ; IMC : Indice de Masse Corporelle ; kg : kilogramme ; M : Moyenne ; m : mètre ; n : nombre.*

3.2. Résultats sur les tests ST, DT et la DTE

Les résultats sur les tests ST et DT et sur la DTE pour les deux groupes sont donnés dans le Tableau 5 et le Tableau 6.

3.2.1. Résultats en ST

Des différences significatives sont observées entre les deux groupes pour les tests cognitifs ST. Le groupe Jeunes a obtenu de meilleures performances que le groupe Âgés pour les deux ST cognitives : 1) *le score cognitif ST environnement* ($t(30) = 2,11$, $p = 0,043$, $d = 0,75$, IC 95 % de la différence de moyenne = 0,09 – 5,82) et 2) le *score cognitif ST autogénérée* ($t(30) = 2,33$, $p = 0,027$, $d = 0,82$, IC 95 % de la différence de moyenne = -17,80 – -1,16). Cependant, aucune différence n'est observée pour le *score ST moteur* ($t(30) = 0,35$, $p = 0,731$, $d = 0,12$, IC 95 % de la différence de moyenne = -3,51 – 2,49).

3.2.2. Résultats en DT

Le groupe Jeunes a surpassé le groupe Âgés sur tous les paramètres. Une différence significative est observée pour les deux tâches cognitives en DT : 1) le *score cognitif DT environnement* ($t(30) = 2,59$, $p = 0,015$, $d = 0,92$, IC 95 % de la différence de moyenne = 0,87–7,30), 2) le *score cognitif DT autogénérée* ($t(30) = 2,29$, $p = 0,030$, $d = 0,81$, IC 95 % de la différence de moyenne = -16,48 – -0,93), et les deux tâches motrices en DT : 1) le *score moteur DT environnement* ($t(30) = 2,36$, $p = 0,025$, $d = 0,84$, IC 95 % de la différence de moyenne = -5,82 – -0,42) et 2) le *score moteur DT autogénérée* ($t(30) = 3,01$, $p = 0,005$, $d = 1,07$, IC 95 % de la différence de moyenne = -8,05 – -1,55).

Tableau 5. Scores en ST pour les Jeunes et les Âgés (étude 2)

	Jeunes		Âgés	
	M (ET)	*IC 95 %*	*M (ET)*	*IC 95 %*
Cognitif				
Environnement - comptage sonore (n)	0,87 (1,13)*	0,24 – 1,49	3,82 (5,32)*	1,09 – 6,56
Autogénérée - décompte (n)	21,07 (13,55)*	13,57 – 28,57	11,59 (9,35)*	6,79 – 16,40
Moteur				
STEP (n)	23,33 (4,43)	20,88 – 25,79	22,82 (3,88)	20,83 – 24,82

Note. *ET : Écart-Type ;* IC 95 % : Intervalle de Confiance à 95 % ; *M : Moyenne ; n : nombre. Le score de la tâche cognitive induite par l'environnement - comptage sonore en simple-tâche (ST) correspond à la différence entre le nombre réel de bips et le nombre donné par le participant en ST. Le score de la tâche cognitive autogénérée - décompte en ST correspond au nombre de réponses correctes en ST. Le score moteur - STEP en ST correspond au nombre d'allers-retours réalisés en ST.* * *p < 0,05, différence entre les scores des groupes Jeunes et Âgés.*

Tableau 6. Scores en DT et DTE pour les Jeunes et les Âgés (étude 2)

	Jeunes				Âgés			
	Cognitif		***Moteur***		***Cognitif***		***Moteur***	
	M (ET)	IC 95 %	M (ET)	IC 95 %	M (ET)	IC 95 %	M (ET)	IC 95 %
DT								
Environnement - comptage sonore (n)	1,27 (1,33)*	0,53 – 2,01	24,53 (3,87)*	22,39 – 26,68	5,35 (5,96)*	2,29 – 8,42	21,41 (3,61)*	19,56 – 23,27
Autogénérée - décompte (n)	19,47 (12,22)*	12,70 – 26,24	19,80 (3,28)**	17,98 – 21,62	10,76 (9,26)*	6,00 – 15,53	15,00 (5,34)**	12,26 – 17,75
DTE								
Environnement - comptage sonore (n)	-0,46 (1,99)	-1,56 – 0,64	0,05 (0,14)*	-0,03 – 0,13	-0,40 (1,31)	-1,07 – 0,27	-0,06 (0,16)*	-0,14 – 0,02
Autogénérée - décompte (n)	-0,08 (0,19)	-0,18 – 0,03	-0,15 (0,19)**	-0,43 – -0,26	-0,07 (0,24)	-0,20 – 0,05	-0,34 (0,17)**	-0,43 – -0,26

Note. *DT : Double-Tâche ; DTE : Dual-Task Effect (effet double-tâche) ; ET : Écart-Type ;* IC 95 % : Intervalle de Confiance à 95 % ; *M : Moyenne ; n : nombre. Pour la DT, le score de la tâche cognitive induite par l'environnement - comptage sonore en DT correspond à la différence entre le nombre réel de bips et le nombre indiqué par le participant en DT. Le score de la tâche cognitive autogénérée - décompte en DT correspond au nombre de réponses correctes en DT. Le score moteur - STEP en DT correspond au nombre d'allers-retours réalisés en DT. Le DTE permet d'évaluer l'impact relatif de la DT par rapport à la performance en ST, selon la formule : (DT - ST) / MoyenneGroupeST. Un DTE positif indique une meilleure performance en DT qu'en ST (bénéfice), tandis qu'un DTE négatif indique une performance moins bonne en DT qu'en ST (coût).* * *p < 0,05,* ** *p < 0,01, différence entre les scores des groupes Jeunes et Âgés.*

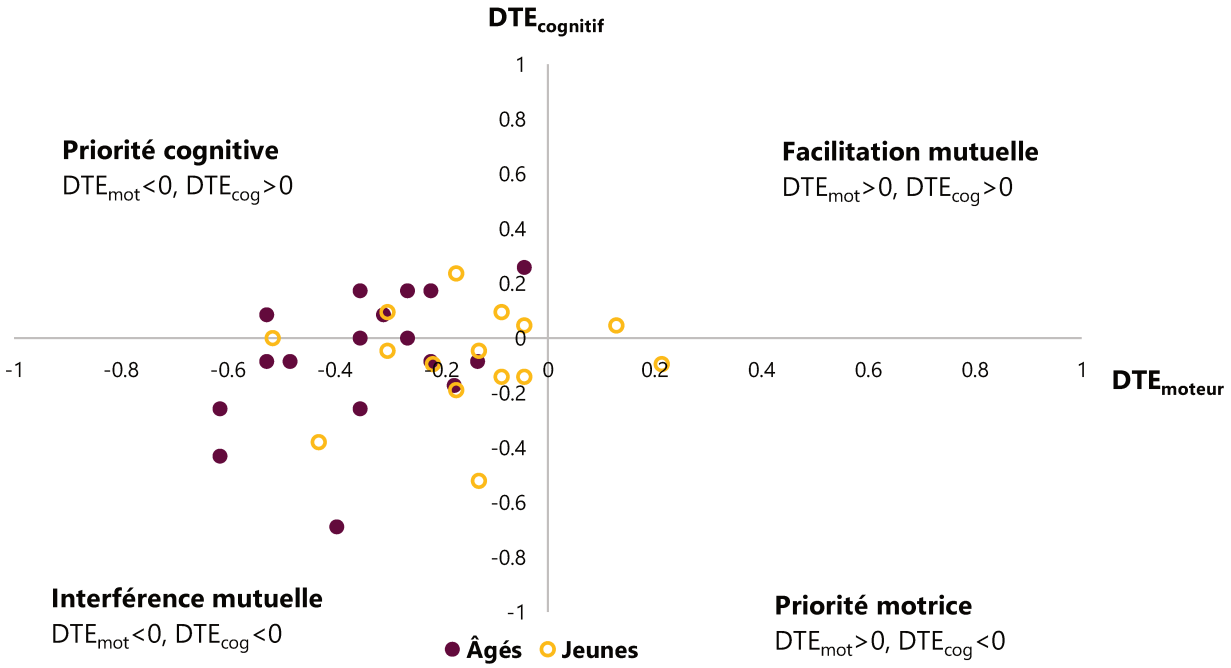
3.2.3. Résultats sur le DTE

Pour comprendre l'effet de priorisation et/ou d'interférence au sein des groupes entre les deux tâches pendant la DT, la caractéristique de performance opérationnelle (*performance operating characteristic*) est utilisée à partir du modèle de Fallahtafti et al. (2021). Deux graphiques sont élaborés, l'un pour la DT autogénérée (décompte, Figure 17a) et l'autre pour la DT environnement (comptage des sons, Figure 17b). L'axe des abscisses représente la performance motrice (DTE_{moteur}) calculée à l'aide du test STEP, tandis que l'axe des ordonnées correspond à la performance cognitive ($DTE_{cognitif}$) de la tâche cognitive.

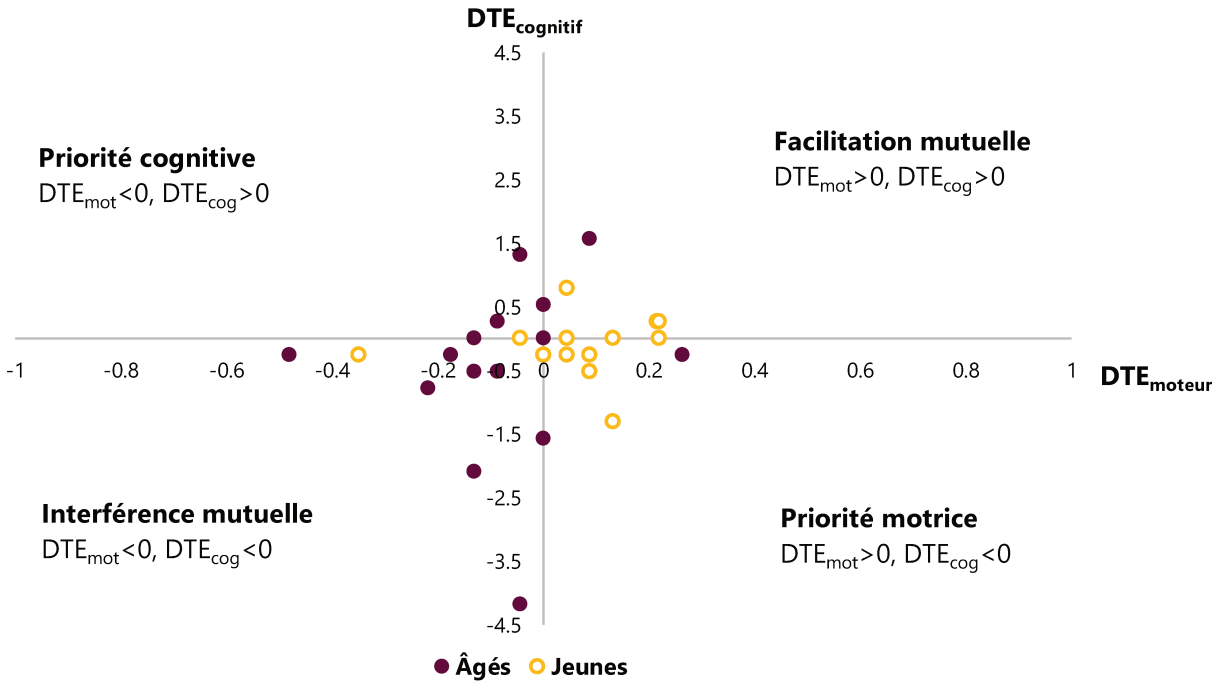
La réalisation simultanée d'une tâche cognitive et d'une tâche motrice entraîne différents patterns d'interférence. Cela comprend quatre principaux changements (i.e., facilitation de la tâche motrice, interférence de la tâche motrice, facilitation de la tâche cognitive, interférence de la tâche cognitive), les combinaisons possibles de ces changements, ainsi qu'aucune modification. Ainsi, neuf patterns potentiels d'interférences sont identifiés (pour une description plus détaillée, voir Plummer et al., 2013).

DTE autogénéré. Comme illustré dans la Figure 17a, une interférence mutuelle des tâches cognitive et motrice est observée chez la majorité des participants (53,12 %), avec une distribution homogène entre les groupes Âgés (52,94 %) et Jeunes (53,33 %). Presque tous les participants (93,75 %) ont présenté une interférence dans leur tâche motrice (100 % Âgés, 86,67 % Jeunes). Par ailleurs, 40,62 % des participants ont priorisé la tâche cognitive au détriment de la tâche motrice (47,06 % Âgés, 33,33 % Jeunes). En ce qui concerne le DTE moteur, le groupe Jeunes obtient de meilleurs résultats que le groupe Âgés ($t(30) = 3,04$, $p = 0,005$, $d = 1,08$, IC 95 % de la différence de moyenne = -0,32 – -0,06). Aucune différence significative n'est constatée pour le DTE cognitif ($t(30) = 0,06$, $p = 0,950$, $d = 0,02$, IC 95 % = -0,15 – 0,16).

DTE environnement. Comme illustré dans la Figure 17b, ce sont principalement les adultes Âgés qui présentent une interférence mutuelle (41,18 % Âgés, 6,67 % Jeunes). La tâche motrice est facilitée pour la majorité du groupe Jeunes (66,67 %), contre seulement 17,65 % pour le groupe Âgés. Pour le DTE moteur, le groupe Jeunes obtient de meilleurs résultats que le groupe Âgés ($t(30) = 2,12$, $p = 0,043$, $d = 0,75$, IC 95 % = -0,22 – 0,00). Aucune différence significative n'est observée pour le DTE cognitif ($t(30) = 0,10$, $p = 0,917$, $d = 0,04$, IC 95 % = -1,14 – 1,26).



(a) DTE autogénéré



(b) DTE environnement

Figure 17. Caractéristiques de la performance opérationnelle (étude 2)

Note. *DTE_{moteur} = effet de la double-tâche sur la tâche motrice ; $DTE_{cognitif}$ = effet de la double-tâche sur la tâche cognitive.*

3.3. Différences entre les DTE moteur et cognitif

3.3.1. Tâche de décompte (autogénérée)

Il y a un effet significatif de la *tâche* ($F(1, 30) = 16{,}96$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}15$) : les deux groupes montrent une interférence motrice plus prononcée que l'interférence cognitive pour la tâche de décompte (résultats détaillés en Annexe 6). Une interaction significative *tâche x groupe* a également été observée ($F(1, 30) = 5{,}42$, $p = 0{,}027$, $\eta^2 = 0{,}05$). Comme le montre la Figure 18, les tests post hoc (Annexe 7) indiquent que le groupe Âgés présente plus d'interférences dans la tâche motrice que dans la tâche cognitive ($t(30) = 4{,}71$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}36$), ce qui n'est pas le cas pour le groupe Jeunes ($p > 0{,}05$). De plus, l'interférence motrice est plus importante chez les Âgés que chez les Jeunes ($t(30) = 2{,}70$, $p = 0{,}029$, $d = 0{,}96$).

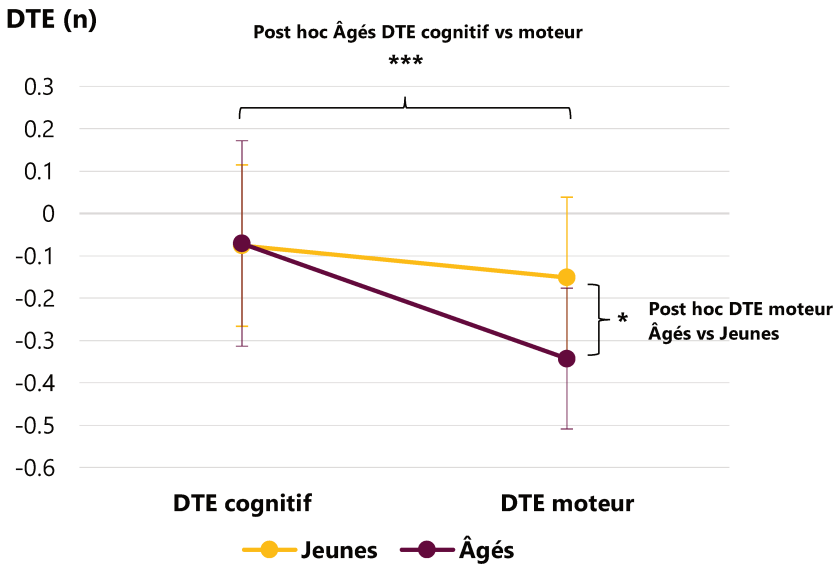


Figure 18. Différence entre le DTE moteur et cognitif en fonction du groupe lorsque la tâche est autogénérée (étude 2)

Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche). * : p < 0,05, *** : p < 0,001*

3.3.2. Tâche de comptage sonore (environnement)

Il n'y a pas d'effet significatif de la tâche, du groupe ou d'effet d'interaction ($p > 0{,}05$) (Annexe 6).

3.4. Différence entre la tâche générée par l'environnement (comptage sonore) et la tâche autogénérée (décompte)

3.4.1. Tâche motrice

Il y a un effet significatif de la *tâche* ($F(1, 30) = 80{,}73$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}32$) (Annexe 8). Comme indiqué dans la Figure 19, la tâche de décompte crée plus d'interférence motrice que la tâche de comptage sonore. Il y a également un effet de *groupe* ($F(1, 30) = 8{,}65$, $p = 0{,}006$, $\eta^2 = 0{,}12$). Les Âgés ont une interférence motrice plus importante que le groupe Jeunes. Par ailleurs, il n'y a pas d'interaction significative *tâche x groupe* ($p > 0{,}05$).

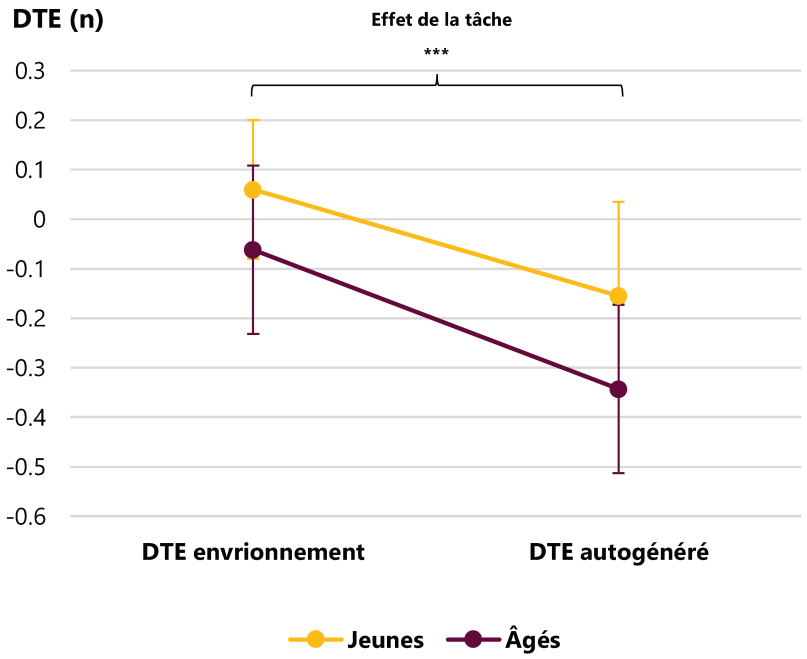


Figure 19. Différence sur le DTE moteur lorsque la tâche cognitive est autogénérée et générée par l'environnement (étude 2)

Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche).* ***** *: p < 0,001*

3.4.2. Tâche cognitive

Il n'y a pas d'effet de la *tâche* ($F(1, 30) = 1{,}48$, $p = 0{,}233$, $\eta^2 = 0{,}02$), du *groupe* ($F(1, 30) = 0{,}01$, $p = 0{,}913$, $\eta^2 = 0{,}00$), ou d'effet d'interaction *tâche x groupe* ($F(1, 30) = 0{,}00$, $p = 0{,}924$, $\eta^2 = 0{,}00$) (Annexe 8).

4. DISCUSSION

4.1. Effet de l'âge sur les ST et DT

Une étape préliminaire de cette étude consistait à vérifier si les tâches cognitives et la tâche motrice des deux nouveaux tests de DT cognitivo-moteurs mettaient bien en évidence un effet de l'âge. Les résultats indiquent que les tâches cognitives en ST et les tests de DT (tâches cognitives et motrices pour les deux tests DT) se révèlent efficaces pour montrer un effet de l'âge. Cependant, aucune différence significative n'est observée entre les deux groupes pour la tâche motrice en ST. Les participants étaient en bonne santé physique et cognitive, ce qui limite les différences entre Jeunes et Âgés, notamment si la tâche est effectuée à un rythme « préféré » (la tâche motrice étant la seule réalisée avec un rythme « naturel »). À l'opposé, la tâche cognitive devait être réalisée aussi rapidement que possible pour la tâche de décompte (autogénérée) et à un rythme externe pour la tâche de comptage sonore (générée par l'environnement). Enfin, la tâche motrice est complexe mais non nouvelle : les participants sont souvent confrontés à franchir des marches d'escaliers dans leur quotidien. Cela peut ainsi réduire les différences potentielles entre Jeunes et Âgés.

4.2. Impact de la nature de la tâche cognitive sur le DTE

L'objectif principal de cette étude était de déterminer l'effet de l'âge sur le DTE (*Dual-Task Effect,* effet de la double-tâche) cognitif et moteur, en fonction de la nature des tâches cognitives (générée par l'environnement - dépendante du contexte et non contrôlée par l'individu ; autogénérée - indépendante du contexte et générée par l'individu).

4.2.1. Effet différentiel en fonction du mode de génération de la tâche cognitive sur le DTE moteur

Le mode de génération des tâches cognitives influence le DTE moteur car la tâche autogénérée (décompte) crée des interférences motrices pour les deux groupes, tandis que ce n'est pas le cas lorsque la tâche est générée par l'environnement (comptage sonore). Ces tâches ne sollicitant pas les mêmes fonctions cognitives (attention pour le décompte et mémoire de travail pour le comptage sonore), elles peuvent mobiliser des processus cognitifs différents. Ainsi, selon le type de tâche, le comportement en DT peut différer. La méta-analyse de Bahureksa et al. (2017) a montré que, pour avoir un effet sur la marche en DT, la tâche cognitive devait être difficile et exiger une forte charge cognitive. Les auteurs ont montré que la marche réalisée simultanément avec une tâche arithmétique était plus efficace que la fluence verbale pour discriminer les patients atteints de troubles cognitifs légers. Plus une tâche exige des ressources cognitives, plus elle affecte la performance motrice et les paramètres spatio-temporels

de la marche en DT. La présente étude confirme les résultats précédents sur les tâches de marche, avec de nouvelles informations sur une tâche motrice plus complexe. Effectivement, la tâche autogénérée provoque plus d'interférence que celle générée par l'environnement, comme l'ont suggéré les résultats d'Al-Yahya et al. (2011) avec les tâches de marche en DT. De plus, les modalités sensorielles (e.g., les entrées auditives vs visuelles, les sorties vocales vs manuelles) des tâches cognitives peuvent influencer l'interférence dans la performance en DT. Dans cette étude, la sortie vocale, qui implique la production de langage pendant les tâches autogénérées, peut être la source d'une interférence plus importante.

4.2.2. Effet de l'âge sur l'interférence motrice

Le groupe Âgés montre plus d'interférences motrices que le groupe Jeunes lorsque la tâche cognitive est autogénérée. Comme l'indiquent Wollesen et Voelcker-Rehage (2014), l'hypothèse de capacité réduite (*reduced capacity hypothesis*) suggère que, pour atteindre le même niveau de performance, une tâche motrice exige davantage de ressources attentionnelles chez les personnes âgées que chez les jeunes. Ainsi, les coûts en DT apparaissent plus élevés chez les aînés (Albinet et al., 2006 ; Al-Yahya et al., 2011 ; Schaefer, 2014). Toutefois, dans la présente étude, l'âge n'affecte pas le DTE moteur lorsque la tâche cognitive est générée par l'environnement. La tâche cognitive n'entraîne potentiellement pas suffisamment d'interférences pour révéler un effet de l'âge.

4.2.3. Effet de la nature de la tâche cognitive sur l'interférence entre les tâches motrices et cognitives

En DT autogénérée, les Jeunes et les Âgés présentent une interférence mutuelle, avec une interférence plus élevée au niveau moteur que cognitif, et les personnes âgées montrent à nouveau une différence plus prononcée que celle des jeunes. Ces résultats font écho aux travaux de Shumway-Cook et al. (1997), qui ont montré que les jeunes et les âgés en bonne santé priorisent la tâche cognitive lorsque la tâche posturale ne représente pas une menace pour l'équilibre. Cependant, une menace peut inverser cette priorité puisque Brown et al. (2002) ont révélé que lorsque celle-ci augmentait, la stabilité posturale des personnes âgées serait privilégiée au détriment de la tâche cognitive (alors qu'ils ont trouvé le contraire en l'absence de menace). Schaefer et Schumacher (2011) ont souligné dans une revue de littérature que les personnes âgées avaient tendance à prioriser la performance de marche par rapport aux tâches cognitives, ce qui pourrait s'expliquer par une protection contre le risque de chute. Ainsi, les personnes âgées présentent souvent des interférences en DT plus importantes que les jeunes adultes et ont tendance à privilégier le domaine moteur (Schaefer, 2014), et cette priorisation tend à être plus marquée lorsque les individus sont très sollicités ou lorsque la tâche motrice comporte une menace

pour l'équilibre ou un risque de chute (Verghese et al., 2007 ; Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Cela s'explique par le phénomène de « *Posture First* » se produisant principalement chez les personnes âgées, lorsque la menace posturale nécessite une allocation des ressources attentionnelles pour assurer le contrôle postural au détriment des performances cognitives. Par ailleurs, ce phénomène peut apparaître surtout lorsque la tâche motrice implique l'équilibre ou la marche, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude.

En DT générée par l'environnement, le groupe Jeunes priorise la tâche motrice par rapport à la tâche cognitive, tandis que le groupe Âgés détériore les deux tâches. Néanmoins, il n'y a pas de différence significative entre les DTE cognitif et moteur entre les groupes d'âge, ce qui peut notamment s'expliquer par une variabilité importante sur le DTE cognitif. Par ailleurs, le niveau de difficulté de la tâche générée par l'environnement peut être à l'origine de la différence de pattern d'interférence entre les Jeunes et les Âgés. Dans leur étude réalisée auprès de 32 jeunes (moyenne d'âge = 25,0 ans) et 32 âgés (moyenne d'âge = 73,6 ans), Lövdén et al. (2008) ont montré que, peu importe l'âge, une tâche cognitive facile (1-back) réduisait l'interférence motrice (marche sur tapis roulant à une vitesse préférée) par rapport à une tâche motrice réalisée seule. Cela suggère que les tâches motrices automatisées sont réalisées plus efficacement lorsque l'attention est focalisée sur autre chose. Ensuite, l'augmentation de la charge de mémoire de travail (passage de 1-back à 4-back) a entraîné de nouveau une réduction de l'interférence motrice chez les jeunes adultes, mais pas chez les adultes plus âgés qui subissent quant à eux, une interférence motrice dès la difficulté supérieure (2-back). Un an plus tard, l'équipe de chercheurs (Verrel et al., 2009) étend ce paradigme en ajoutant un groupe âgés-âgés (âgés de 70 à 80 ans), pour les comparer à des jeunes-âgés (âgés de 60 à 70 ans) et à des jeunes (20 à 30 ans). Les auteurs montrent que l'augmentation de la difficulté de la tâche cognitive influence plus fortement les plus âgés. Dans la présente étude, il est possible que les jeunes aient tiré parti d'un focus externe de l'attention induit par une tâche cognitive facile, améliorant ainsi la performance motrice en DT, ce qui n'est pas le cas des âgés.

4.2.4. Effet du mode de génération de la tâche cognitive sur le DTE cognitif

Le mode de génération de la tâche cognitive n'a pas d'impact sur l'interférence cognitive en DT dans cette étude. Les coûts cognitifs en DT autogénérée sont très faibles comparés à ceux en DT générée par l'environnement pour les groupes Jeunes et Âgés. Cependant, les interférences en DT autogénérée sont amplifiées par quelques valeurs extrêmes, et il n'y a pas de différence significative entre les coûts en DT cognitifs autogénérée et générée par l'environnement. Bien que la nature de la tâche cognitive ait un impact sur la tâche motrice, elle n'affecte pas significativement les performances cognitives.

Des études futures sont nécessaires pour examiner si les résultats de cette étude se généralisent à des situations de DT utilisant des tâches plus complexes et/ou nouvelles. En effet, Ehsani et al. (2019) ont montré qu'une tâche motrice non habituelle, comme des flexions répétées du coude, était plus exigeante qu'une tâche quotidienne comme la marche. Une tâche motrice non familière pourrait nécessiter davantage d'activation du cortex moteur, créant plus d'interférences en DT. Bien que la présente étude soutienne l'importance de créer des tests écologiques impliquant des situations proches de la vie quotidienne (comme la tâche STEP, qui est similaire à monter des escaliers), étudier d'autres tâches pourrait permettre de mieux comprendre l'effet de la nouveauté sur les interférences motrices et cognitives des tests en DT. De plus, il serait intéressant d'augmenter la difficulté de la tâche en demandant aux participants d'effectuer la tâche motrice de STEP aussi rapidement que possible afin de déterminer si cela influence les interférences cognitives.

Dans cette étude, l'attention était portée sur la comparaison de deux modes de génération : autogénérée vs générée par l'environnement. Néanmoins, la tâche elle-même peut être à l'origine des interférences différentielles. Fallahtafti et al. (2021) ont réalisé une étude auprès de 20 personnes âgées (âge moyen = 71,0 ans) qui ont effectué trois tâches cognitives autogénérées (i.e., fluidité verbale, fluidité catégorielle, soustraction en série) en condition assise et en condition de marche sur tapis roulant à un rythme choisi. Les deux tâches de fluidité ont entraîné un coût moteur et cognitif (avec une interférence motrice plus élevée pour la fluidité catégorielle), alors que la tâche de soustraction en série a généré une interférence motrice, mais également une facilitation cognitive. Ainsi, le mode de génération (i.e., autogénérée, générée par l'environnement), la nouveauté, la difficulté de la tâche, mais également la tâche elle-même, influencent les interférences.

La présente étude implique un échantillon de petite taille composé majoritairement de femmes, ce qui limite la généralisation des résultats. De plus, seuls des participants en bonne santé ont été inclus, étant donné qu'elle a été conçue pour étudier les performances de la population étudiée dans les études 4 et 5. Cela ne permet pas de refléter la variabilité de l'interférence observée chez des populations présentant des troubles de la mobilité ou des déficits cognitifs. Malgré cela, cette étude a permis de formuler certaines pistes pour créer des tests efficaces en matière d'interférences, comme l'utilisation de tâches cognitives autogénérées (indépendantes du contexte et générées par l'individu) et de tâches motrices complexes. À la suite de cette étude, le test de DT autogénéré sera conservé et intégré au protocole d'évaluation des études 4 et 5. Tout comme l'étude 1, cette étape s'inscrit dans une démarche progressive visant à construire un protocole d'évaluation à la fois sensible et applicable en conditions écologiques dans le cadre des études ultérieures de cette thèse.

Synthèse des études 1 et 2

Les deux premières études s'inscrivent dans une démarche méthodologique visant à renforcer la validité des prochaines études de cette thèse. En développant de nouveaux tests cognitifs et de DT cognitivo-motrice, ils permettent de dépasser les limites des tests traditionnels, critiqués pour leur manque de valeur écologique et de sensibilité. Ces travaux ont conduit à la sélection de deux tests, à savoir le test d'inhibition DLI et la DT autogénérée, afin de constituer une batterie intégrant à la fois de nouveaux outils et des mesures conventionnelles pour évaluer les sphères cognitive et corporelle. Le questionnement central de cette thèse prend véritablement forme à partir de l'étude suivante (étude 3), qui amorce l'exploration de l'expérience globale des exergames, en amont de l'étude interventionnelle principale (études 4 et 5).

ÉTUDE 3 - ÉTUDE COMPARATIVE DE L'EXPÉRIENCE GLOBALE D'UNE SESSION DE TROIS DIFFÉRENTS EXERGAMES AUPRÈS DE PERSONNES ÂGÉES

1. OBJECTIFS

L'objectif de cette étude est d'analyser l'expérience globale des sessions de trois exergames[1] auprès de personnes âgées en bonne santé. Il s'agit ainsi d'une étude préliminaire à l'étude 4, dans laquelle les effets de ces trois exergames, et d'autres programmes, seront évalués et comparés en suivant une méthodologie interventionnelle.

Avant de mettre en œuvre des études à grande échelle comme l'étude 4, Campbell (2000) recommande d'adopter une approche itérative et progressive, dans laquelle des études exploratoires précèdent les essais contrôlés et randomisés, afin d'évaluer les effets sur la santé. Il est aujourd'hui largement reconnu que les exergames doivent être conçus pour répondre aux attentes et aux besoins spécifiques de leurs utilisateurs cibles (Gerling & Mandryk, 2014). S'ils ne sont pas adaptés aux personnes âgées, ils peuvent entraîner une fatigue cognitive (Holtzer et al., 2010 ; Lampit et al., 2014), générer du stress ou induire un phénomène de « *Posture First* », réduisant ainsi l'engagement dans l'activité. À cet égard, la charge de travail d'une séance, représentant l'effort requis par l'utilisateur pour accomplir la tâche, doit être équilibrée. Elle doit fournir une stimulation cognitive suffisante tout en assurant une intensité physique modérée à élevée, conformément aux recommandations (Audiffren et al., 2011 ; Swain et al., 2012) d'intensité adéquate pour générer des bénéfices physiques et cognitifs sans provoquer de fatigue excessive. La charge de travail constitue ainsi un outil pertinent pour évaluer le système (Hart, 2006) et concevoir des technologies interactives mieux alignées avec les capacités des utilisateurs (Longo, 2018). Pour favoriser une adoption durable, les exergames doivent également proposer une expérience engageante et attrayante. Cela nécessite une approche de conception centrée sur l'utilisateur (Nawaz et al., 2014). L'expérience utilisateur (*User eXperience*, UX), c'est-à-dire le résultat de l'interaction entre l'utilisateur, le système et le contexte, est une mesure de plus en plus utilisée pour

[1] Ici, le terme exergames est utilisé de manière large, y compris pour désigner le dispositif VÉLO-JV. Pourtant, ce dernier ne répond pas entièrement à la définition d'un exergame, qui implique une interaction en temps réel entre les mouvements du joueur et le déroulement du jeu (stimulation incorporée selon le modèle d'Herold et al., 2018). Dans le cas de VÉLO-JV, bien que la stimulation physique (le pédalage) soit présente, elle n'influence pas directement le jeu, et inversement (stimulation additionnelle).

évaluer les exergames destinés aux personnes âgées (Nawaz et al., 2014 ; Pyae et al., 2017 ; Thin et al., 2013 ; Vaziri et al., 2016). L'UX partage de nombreuses bases communes avec l'utilisabilité (*usability*)[1] (Nielsen, 1994), jugée généralement insuffisante pour prédire et expliquer l'acceptation (*acceptance*)[2] des technologies. L'UX élargit la notion d'utilisabilité en intégrant des dimensions émotionnelles, subjectives et temporelles qui caractérisent l'expérience individuelle lors de l'interaction avec la technologie, ce qui est particulièrement important pour l'utilisation des systèmes interactifs par les personnes âgées. Hassenzahl (2003) a conçu un modèle pragmatique-hédonique de l'UX, où la qualité des interactions est perçue selon deux types d'attributs : les qualités pragmatiques, directement liées à l'accomplissement des tâches et à l'utilisation du produit, et les qualités hédoniques, qui mettent l'accent sur le bien-être psychologique. Ces deux attributs se combinent pour générer une évaluation globale de l'attractivité (*attractiveness*) du produit. Celle-ci entraîne des conséquences comportementales (e.g., usage accru) et émotionnelles (e.g., plaisir) (Hassenzahl, 2003). Il est ainsi pertinent d'évaluer le plaisir associé à l'usage des exergames, en lien avec l'UX, notamment en raison de leur dimension ludique qui pourrait inciter les utilisateurs à bouger au-delà des mouvements strictement requis pour le jeu (Lyons et al., 2014). Roto (2007) propose d'ailleurs d'ajouter cette mesure de plaisir pour compléter celle de l'UX, comme l'ont fait d'autres chercheurs (e.g., Adcock et al., 2019 ; Hoda et al., 2013 ; Soltani et al., 2020). Les études récentes portant sur l'évaluation de l'UX des exergames auprès de personnes âgées rapportent généralement une UX positive (Adcock, Sonder, et al., 2020 ; K. M. Gerling et al., 2011).

Dans ce contexte, cette étude vise à mieux comprendre les spécificités de trois types d'expériences globales d'exergames. La première représente la plateforme d'exergames commerciaux grand public la plus utilisée dans la littérature, à savoir la *Nintendo Wii*, lancée en 2006, remplacée par la *Nintendo Switch* (SWITCH) en 2017. Les exergames commerciaux offrent un entraînement cognitivo-moteur pertinent. Ils sont abordables, avec un coût modéré permettant leur acquisition par des particuliers, des associations ou des structures à budget limité. Leur installation est simple, ne nécessitant qu'un écran standard, et leur utilisation intuitive réduit la barrière d'anxiété technologique chez les personnes âgées, favorisant l'autonomie et l'utilisation répétée à domicile. Ces caractéristiques leur confèrent un potentiel de diffusion large dans des programmes de prévention, notamment dans des

[1] L'utilisabilité désigne la mesure dans laquelle des utilisateurs spécifiés peuvent utiliser un produit pour atteindre des objectifs spécifiés avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation précis (ISO 9241-11) (voir Nawaz et al., 2016).

[2] L'acceptation d'une technologie renvoie à l'intention d'usage et/ou à l'usage effectif. Plusieurs modèles théoriques existent tels que le TAM (Technology Acceptance Model, Davis et al., 1989) ou l'UTAUT (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology, Venkatesh et al., 2003). En revanche, l'acceptabilité (*acceptability*) désigne le jugement *a priori* de pertinence/appropriation d'une technologie.

contextes de ressources budgétaires limitées, contribuant ainsi à la réduction des inégalités d'accès à la pratique d'activités physiques. Par ailleurs, ils peuvent présenter plusieurs limites, notamment un manque d'intensité physique et de complexité motrice, souligné par certains auteurs (e.g., Hernandez-Martinez et al., 2024). Depuis les années 2020, une nouvelle génération d'exergames, les EM2I, se développe. Ils nécessitent des investissements financiers et matériels importants. Leur coût d'installation est élevé, nécessitant un espace dédié, des équipements de projection et des logiciels spécifiques, limitant leur acquisition aux structures disposant de financements relativement conséquents. Toutefois, ces dispositifs offrent des possibilités d'entraînement immersif et multi-domaine, favorisant la stimulation motrice complexe et cognitive ainsi que l'engagement social. Parmi les EM2I, figure notamment *Neo One*, par *NeoXperiences* (Béraud-Peigné et al., 2024 ; Béraud-Peigné, Maillot, et al., 2023), utilisé dans cette étude. La troisième catégorie d'exergames étudiée représente les dispositifs associant des exercices physiques (e.g., cyclisme, kayak) et une stimulation cognitive virtuelle (e.g., jeux vidéo, cartes interactives) (Anderson-Hanley et al., 2012, 2018 ; Barcelos et al., 2015). Ici, est combinée la pratique du vélo stationnaire à celle des jeux vidéo (VÉLO-JV). Ces trois expériences se différencient principalement par l'intégration de la stimulation motrice au jeu vidéo. Selon le modèle d'Herold et ses collaborateurs (2018), l'entraînement simultané se décompose en deux modalités : *Thinking While Moving* (additionnel), lorsque la tâche cognitive additionnelle n'est pas liée à la tâche motrice, tel que VÉLO-JV, et *Moving While Thinking* (incorporé), quand la tâche cognitive est intégrée à la tâche motrice, comme EM2I et SWITCH. De plus, ces trois expériences offrent des sollicitations différentes, avec un entraînement multi-domaine pour EM2I, cognitivo-moteur pour SWITCH et cognitivo-physique pour VÉLO-JV. L'interaction, l'immersion, le type de contrôleur (e.g., contrôleur corporel, contrôleur à boutons, contrôleur mixant gestuel et à boutons) ainsi que les caractéristiques des jeux eux-mêmes diffèrent également selon les dispositifs[1]. Ces aspects sont encore peu pris en compte lors de l'évaluation des effets des exergames dans les études interventionnelles, pourtant ils pourraient influencer l'expérience de jeu et l'efficacité des programmes.

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer ces trois exergames en termes d'UX, de charge de travail, de plaisir ressenti et d'intensité physique, dans le but d'optimiser la conception du protocole d'intervention de l'étude 4 et l'interprétation de ses résultats. Cette approche présente un caractère original, dans la mesure où, bien que de nombreuses recherches aient exploré les effets des exergames chez les personnes âgées, peu d'entre elles ont comparé qualitativement différents types de

[1] Ces modalités sont détaillées dans la partie 2.2 de la méthode.

dispositifs. Les travaux existants se concentrent le plus souvent sur une seule plateforme, comparent deux modalités avec une exposition brève aux jeux (Thin et al., 2013) ou possèdent des tailles d'échantillon réduites (K. M. Gerling et al., 2011).

Il est supposé que les trois sessions d'entraînement d'exergames (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) induiront une intensité physique conforme aux recommandations pour les personnes âgées (modérée à élevée), accompagnée d'une charge de travail appropriée et d'une UX globalement positive. Il est également présumé que les exergames incorporés EM2I et SWITCH offriront une intensité physique et une UX supérieures à celles de VÉLO-JV, ce dernier proposant un entraînement additionnel, potentiellement moins engageant et moins adapté au public âgé. De plus, une charge de travail plus élevée est attendue pour l'entraînement additionnel (VÉLO-JV) par rapport aux deux entraînements incorporés (EM2I, SWITCH).

2. MÉTHODE

Cette étude a fait l'objet de deux publications. La première est présentée en Annexe 9, la seconde en Annexe 10.

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2023). **The user experience of an immersive and interactive wall exergame in older adults.** *Games for Health Journal*, 12(3), 220-227. Doi: 10.1089/g4h.2022.0075

Béraud-Peigné, N., Perrot, A., & Maillot, P. (2025). **Active Video Games Training for Older Adults: Comparative Study of User Experience, Workload, Pleasure, and Intensity.** *JMIR Serious Games*, 13(1), e67314. Doi: 10.2196/67314

2.1. Population

Les participants potentiels ont répondu positivement à un appel à participation diffusé par courriel et par le biais de flyers distribués dans des associations et des clubs seniors en Île-de-France (France). Les critères d'inclusion suivants ont été vérifiés lors d'un premier contact téléphonique : a) avoir plus de 60 ans, b) obtenir un score de 3 ou plus sur une échelle de santé subjective (1 = très mauvais à 5 = excellent), c) ne présenter aucune pathologie majeure, et d) avoir une vision et une audition normales ou corrigées. Une analyse de puissance basée sur le principal test statistique prévu pour cette étude (ANOVA inter-sujets à un facteur, 3 groupes), a révélé qu'un échantillon de 66 participants était nécessaire (α = 0,05 ; puissance = 0,80 ; taille d'effet : f = 0,40). Le protocole expérimental a été approuvé par le Comité d'Éthique de la Recherche de l'Université Paris-Saclay (CER-Paris-Saclay-2023-084).

2.2. Procédure

Les participants ont été répartis en trois groupes (i.e., EM2I, SWITCH, VÉLO-JV). Leur répartition a été déterminée par des contraintes logistiques : les sessions EM2I ont eu lieu en 2023 à Montreuil, et celles des groupes SWITCH et VÉLO-JV en 2024 à Paris. Les caractéristiques (i.e., typologie de stimulation, interaction, contrôleur, jeux, position corporelle) sont décrites dans la Figure 20.

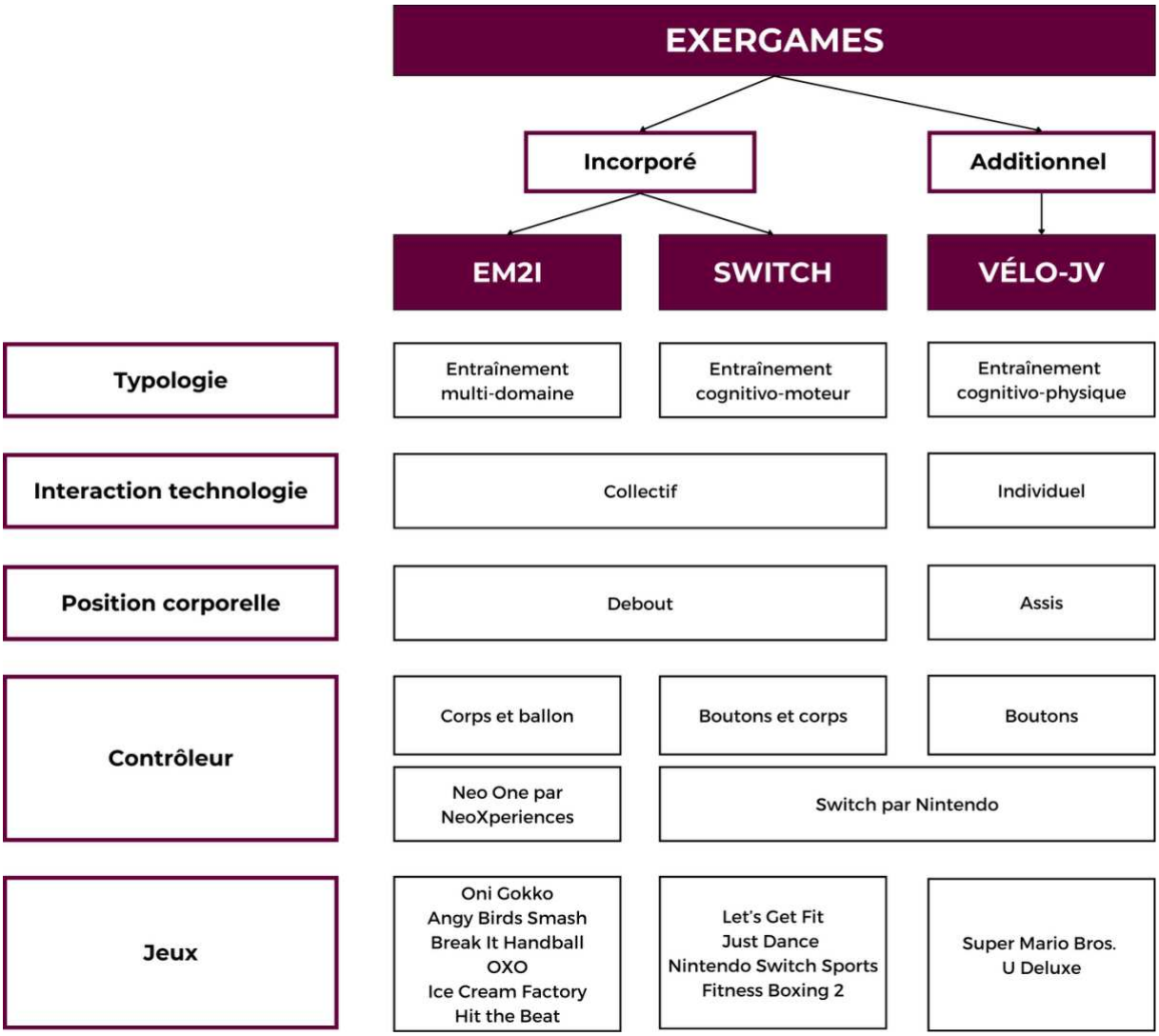


Figure 20. Caractéristiques de chaque exergame (étude 3)

Note. *Trois types d'entraînements par exergames ont été comparés : i) EM2I (Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif), ii) SWITCH (exergames assistés par une console grand public Nintendo Switch), et iii) VÉLO-JV (vélo et jeux vidéo). Pour définir les différents types d'entraînements combinés, la définition modifiée de Torre et Temprado (Torre & Temprado, 2022) et celle de Netz (2019) ont été utilisées. EM2I a été catégorisé comme un entraînement multi-domaine (intégrant des exercices aérobies et/ou de renforcement musculaire, des compétences motrices complexes et de la stimulation cognitive). SWITCH a été classé comme un entraînement cognitivo-moteur, associant un entraînement de compétences motrices complexes avec de la stimulation cognitive. VÉLO-JV a été défini comme un entraînement cognitivo-physique, combinant des exercices aérobies et/ou de renforcement musculaire avec de la stimulation cognitive.*

Pour chaque groupe, le protocole est le même : les participants suivent une session de 45 minutes par groupe de quatre, puis ils remplissent une série de questionnaires. La session est toujours précédée de dix minutes d'exercices, durant lesquelles les participants s'échauffent progressivement. Un EAPA supervise la session. Il garantit la sécurité des participants en surveillant que leur posture soit correcte et explique les exercices. Pour les sessions EM2I et SWITCH, les pauses entre les jeux durent quelques secondes, le temps de changer de jeu.

Groupe EM2I. Le dispositif Neo One (Figure 21a), d'une hauteur d'environ 3 mètres et d'une largeur de 5 mètres, est un EM2I équipé d'un vidéoprojecteur et de capteurs infrarouges fixés au mur permettant de jouer sans casque de réalité virtuelle ni équipement particulier. Ainsi, c'est le corps et/ou un ballon qui contrôle les jeux (et non une manette). Les participants jouent en position debout et sont soumis à un entraînement multi-domaine avec des interactions collectives (i.e., coopération, opposition - multijoueurs). Neo One comprend 20 mini-jeux (nombre de jeux au moment de l'étude, en 2023). Les jeux sont sélectionnés par l'EAPA grâce à un écran tactile déporté, relié à un ordinateur. Des hauts-parleurs permettent d'émettre la musique. Les instructions et règles des jeux sont affichées à l'écran et réexpliquées par l'EAPA si nécessaire. Pour cette étude, la session est composée de six jeux de cinq minutes (Figure 22). Les trois premiers jeux sont coopératifs et les deux suivants compétitifs (2 contre 2). Le dernier jeu est également compétitif mais réalisé en 1 contre 1.

(a) EM2I **(b) SWITCH** **(c) VÉLO-JV**

Figure 21. Photographies de chaque groupe d'exergames (étude 3)
(a) EM2I, (b) SWITCH, (c) VÉLO-JV

Note. *EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; SWITCH : exergames assistés par une console Nintendo Switch ; VÉLO-JV : vélo et jeux vidéo.*

Termes et conditions :
5 minutes, balle en mousse en main, difficulté facile

4 contre 0 ***Oni Gokko.*** Les participants doivent effectuer plusieurs mini-jeux : Pendu, Cherche et trouve, Memory et Lettres Mêlées. L'objectif est de remporter le plus de points possibles. ***Angry Birds Smash.*** Ce jeu consiste à détruire le plus de forteresses et de cochons possible pour passer les niveaux. L'objectif est de réussir les différents niveaux et d'atteindre le plus haut score dans le temps imparti**.** ***Break It Handball.*** Ce jeu consiste à viser les diverses briques qui s'affichent à l'écran pour passer les niveaux. L'objectif du jeu est de réussir les différents niveaux et d'atteindre le plus haut score dans le temps imparti.	**Coopératif**
2 contre 2 ***OXO.*** Ce jeu de réflexion reprend les mécanismes du jeu morpion. L'objectif est d'aligner 3 symboles sur la grille pour remporter la victoire. ***Ice Cream Factory.*** Deux équipes s'affrontent afin d'exécuter le plus rapidement possible des commandes de glaces et remporter des pièces. L'équipe qui remporte le plus de pièces à la fin du temps gagne.	**Compétitif**
1 contre 1 ***Hit the Beat*.*** Lors de ce jeu, les participants doivent toucher au bon moment des cibles qui apparaissent au rythme de la musique.	

Figure 22. Description des jeux EM2I utilisés (étude 3)

Note. **Étant donné qu'« Hit the Beat » se joue à deux joueurs, les deux autres participants effectuent un exercice de renforcement musculaire : un assis-debout sur une chaise tout en lançant une balle. Par paire, face à face, les participants doivent se lever, effectuer une passe, puis s'asseoir à nouveau de manière synchronisée. L'objectif est de réaliser le plus grand nombre de passes possible en 30 secondes. L'exercice est effectué deux fois.*

Groupe SWITCH. Le dispositif *Nintendo Switch* (Figure 21b) est composé d'une console *Nintendo Switch* reliée à une station d'accueil permettant de connecter la console à un écran (ici de 35 pouces). Les contrôleurs sont des manettes Joy-Con (reliées par Bluetooth à la console) équipées d'accéléromètres, de gyroscopes et de caméras infrarouges à détecteur de mouvements. Le dispositif nécessite de combiner l'utilisation des boutons et du Joystick sur les Joy-Con (voir Figure 23) et la réalisation de gestes corporels.

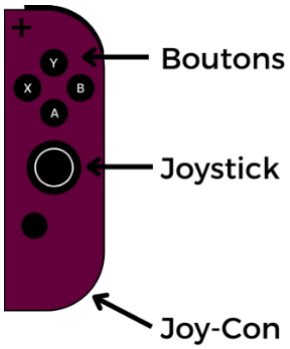


Figure 23. Joy-Con (étude 3)

Les jeux se déroulent en position debout, offrant une sollicitation cognitivo-motrice, avec des interactions collectives (i.e., coopération, opposition – multi-joueurs). Cinq jeux de 5-7 minutes sont utilisés (Figure 24). Pour les deux premiers jeux, les participants jouent tous ensemble, à quatre. Pour les trois derniers jeux, les participants sont séparés en deux groupes de deux, mais jouent simultanément (sur deux écrans différents).

Let's Get Fit. Ce jeu consiste à suivre un avatar qui effectue des mouvements sportifs (e.g., lever les genoux, coups de talon, squats).	**Pas d'opposition**
1 contre 1 contre 1 contre 1 ***Just Dance.*** Les joueurs suivent des chorégraphies de danse à l'écran en imitant les mouvements des danseurs virtuels du mieux qu'ils peuvent. Deux morceaux de musique sont joués : « Rain Over Me » et « Le Bal Masqué ».	**Opposition**
2 contre 2 ***Football sur Nintendo Switch Sports.*** L'objectif du jeu est de marquer plus de buts que son adversaire. Chaque participant déplace son avatar avec le Joystick du Joy-Con tenu dans sa main dominante et frappe le ballon avec un Joy-Con placé sur sa jambe préférée. ***Badminton sur Nintendo Switch Sports.*** L'objectif du jeu est de faire tomber le volant dans le camp adverse, sans que l'adversaire n'arrive à le rattraper. Ce jeu combine des commandes de mouvement (i.e., direction de frappe, timing de frappe, smash) et l'utilisation de boutons (i.e., amorti). ***Fitness Boxing 2.*** Le jeu combine des mouvements inspirés de la boxe (e.g., uppercut, crochet, coup droit) en synchronisation avec la musique et les indications à l'écran.	

Figure 24. Description des jeux SWITCH utilisés (étude 3)

Groupe VÉLO-JV. Les participants jouent à *New Super Mario Bros. U Deluxe*, un jeu de plateforme en 2D sur la console *Nintendo Switch* tout en pédalant sur un vélo stationnaire semi-allongé (*Ultra Green R 2.0 Moovyoo*), offrant ainsi un entraînement cognitivo-physique (Figure 21c). Ce type de vélo favorise une posture stable et sécurisée, adaptée aux personnes âgées, et permet de limiter les contraintes articulaires tout en mobilisant les membres inférieurs de manière continue.

Chaque participant joue individuellement. Les manettes Joy-Con (Figure 23) sont fixées à la console et tenues en main. Dans cette condition, le jeu est sédentaire, mais moteur (voir la classification de Besombes & Maillot, 2018), ainsi le contrôle du jeu repose exclusivement sur l'utilisation des boutons et du joystick (nécessite de ce fait une motricité des doigts). Le jeu *New Super Mario Bros. U Deluxe* consiste à traverser différents mondes en évitant les obstacles, en affrontant des ennemis et en

atteignant le drapeau final de chaque niveau. Le jeu est lancé en mode aventure, en solo. Le personnage Mario (sans assistance particulière[1]) est utilisé. Après avoir expliqué comment utiliser la console de jeu et donné les instructions du jeu, un échauffement de 5 minutes à résistance minimale est effectué sur le vélo. Ensuite, les participants doivent pédaler et jouer pendant 40 minutes, avec une augmentation de la résistance toutes les 3 minutes jusqu'à un niveau minimum de quatre. Ils ont ensuite la possibilité d'augmenter la résistance s'ils le souhaitent.

2.3. Mesures

2.3.1. Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque des participants est relevée en continu tout au long de la session, pour chaque groupe, avec un cardiofréquencemètre équipé d'un capteur optique (*Polar Verity Sense*), placé à l'aide d'un brassard sur la partie supérieure du bras. Plusieurs études de validité indiquent que le capteur *Polar Verity Sense*, par rapport à la ceinture thoracique *H10* (*Polar*), est un outil valide pour mesurer la fréquence cardiaque moyenne et maximale (Dawson et al., 2024 ; Liu et al., 2025). Il permet de remplacer les moniteurs de fréquence cardiaque à sangle thoracique, souvent inconfortables et délicats à placer sur chaque participant, par le brassard, plus pratique et ergonomique.

Plusieurs formules existent pour estimer la Fréquence Cardiaque Maximale Théorique (FCMT), celle de Gellish et al. (2007) (Équation 4) permet de réduire le risque d'erreur d'environ 2 à 5 battements par minute pour les personnes âgées de 30 à 75 ans par rapport aux autres méthodes, ce qui en fait actuellement l'équation la plus précise pour estimer la FCMT.

$$\text{Fréquence cardiaque maximale théorique} = 192 - 0{,}007 \times \text{âge}^2$$

Équation 4. Fréquence cardiaque maximale théorique selon Gellish et al. (2007)

Ainsi, les intensités moyenne et maximale de chaque participant pendant la session ont été calculées comme suit :

$$\text{Intensité moyenne} = \frac{\text{FC moyenne} \times 100}{\text{FCMT}}$$

Équation 5. Intensité moyenne

Note. FC : Fréquence Cardiaque ; FCMT : Fréquence Cardiaque Maximale Théorique.

[1] Les assistances disponibles sont détaillées dans la partie 2.3.5 de la méthode de l'étude 4.

2.3.2. Questionnaires

Le Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées (QAPPA) (de Souto Barreto et al., 2011) est un outil d'auto-évaluation spécifiquement conçu pour mesurer le niveau d'activité physique hebdomadaire des personnes âgées. La méthode de notation repose sur le calcul de la dépense énergétique hebdomadaire, exprimée en MET (*Metabolic Equivalent of Task*).

L'AttrakDiff2 (Hassenzahl et al., 2003) est un questionnaire évaluant l'UX. Il a été traduit et validé en français (Lallemand et al., 2015). Les éléments du questionnaire sont classés en quatre échelles : i) qualités pragmatiques, qui évaluent l'utilisabilité et la facilité perçue d'utilisation, ii) qualités hédoniques - stimulation, qui mesurent le soutien à la stimulation grâce à un contenu, des fonctionnalités et des styles d'interaction nouveaux, intéressants et stimulants, iii) qualités hédoniques - identité, qui évaluent si l'outil soutient sa fonction sociale et communique une certaine identité à l'utilisateur, et iv) attractivité totale, qui mesure la valeur globale perçue du produit basée sur ses qualités pragmatiques et hédoniques. Pour chaque échelle, le score varie de -3 (moins bon score) à 3 (meilleur score).

NASA-Task Load IndeX (NASA-TLX) (Hart & Staveland, 1988) évalue la charge de travail associée à une tâche, selon six dimensions (i.e., exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort, frustration) sur une échelle de 0 à 100 (de 0 = très faible à 100 = très forte). La dimension « performance » est inversée (0 = très forte à 100 = très faible). En raison de la nature multidimensionnelle du NASA-TLX, certaines dimensions peuvent contribuer de manière plus importante au score total, ce qui a conduit à des procédures de pondération pour attribuer des coefficients à chaque dimension. Cependant, ces procédures ont été critiquées pour être longues et complexes (Luximon & Goonetilleke, 2001). Une approche alternative, proposée par Bittner et al. (1989) consiste à utiliser une méthode plus simple en moyennant les scores des six dimensions, appelée **« *Raw* » *Task Load Index* (RTLX).** Ils ont démontré une forte corrélation entre le RTLX et le score traditionnel calculé. Cegarra et Morgado (2009) ont confirmé cette constatation avec la version française de l'échelle.

Le questionnaire de plaisir perçu (Delignières & Perez, 1998) est la validation française de la *Physical Activity Enjoyment Scale* (Kendzierski & DeCarlo, 1991). Il évalue le plaisir perçu lié à l'activité physique et consiste en dix items, cotés de 1 à 7, exprimant un score total sur une échelle de 7 à 70 (meilleur score).

L'échelle de Borg modifiée (Borg, 1982) mesure l'effort perçu pendant l'exercice. Elle est cotée de 0 (aucun effort) à 10 (effort maximal) liée à différents mots d'évaluation correspondants (e.g., effort très facile, difficile, extrêmement difficile) pour aider les individus à évaluer leur niveau d'effort. L'échelle originale de Borg est comprise entre 6 et 20, mais la version modifiée est plus accessible et plus facile à utiliser pour diverses populations, en particulier pour les personnes âgées ou celles ayant des limitations physiques.

L'intention de poursuivre l'utilisation des jeux vidéo actifs. L'envie de continuer à jouer à des jeux vidéo actifs à l'avenir est mesurée à l'aide d'une échelle de Likert en 5 points : tout à fait d'accord, d'accord, neutre, pas d'accord, pas du tout d'accord.

2.4. Analyse des données

Les données descriptives (i.e., moyenne, écart-type) sont rapportées pour toutes les variables. Les différences entre les groupes pour les variables personnelles sont comparées à l'aide d'une analyse de variance à un facteur (ANOVA) pour les variables continues (e.g., âge, IMC, QAPPA) et d'un test du Chi[2] pour les variables catégorielles (i.e., sexe, pratique des exergames).

Pour évaluer si l'UX de chaque groupe est positive, un test *t* de Student à échantillon unique est employé afin de comparer la moyenne de chaque échantillon à une valeur de référence (le seuil a priori de positivité est fixé à 1). Des ANOVA sont utilisées pour comparer le plaisir perçu, la charge de travail de la séance, l'intensité physique et l'UX entre les groupes. Un test de Levene est effectué pour vérifier l'hypothèse d'homogénéité des variances. En cas de violation de cette hypothèse, la correction de Brown-Forsythe est appliquée[1]. Lorsque l'ANOVA révèle un effet significatif, des tests post hoc avec correction de Tukey[2] (ou Games-Howell si l'hypothèse d'homogénéité des variances est violée) sont employés. Des intervalles de confiance à 95 % sont ajoutés pour la différence de moyenne.

Pour tester les corrélations entre les variables, les coefficients de corrélation de Pearson sont utilisés. Toutes les analyses statistiques avec une valeur de $p < 0,05$ sont considérées comme significatives. Les tailles d'effet sont calculées pour étudier la puissance des résultats : êta au carré (η^2)

[1] Cette correction est appliquée lorsque les tailles d'échantillons sont modérément inégales et que les variances sont différentes.

[2] Cette correction est conçue pour les comparaisons par paires, dans une ANOVA à un seul facteur inter-sujets, avec variances égales.

pour les ANOVA, d de Cohen *(d*) pour les tests *t*, *r* de Pearson pour les corrélations. L'interprétation des tailles d'effet en fonction du test est décrite dans le Tableau 7, selon (Cohen, 1988).

Tableau 7. Interprétation des tailles d'effet selon le type de tests statistiques, sur la base des recommandations de Cohen (1988) (étude 3)

Force de la taille d'effet	η^2 - ANOVA	*d* – *t* test	*r* - corrélation
Faible	$0,01 \leq \eta^2 < 0,06$	$0,20 \leq d < 0,50$	$0,10 \leq r < 0,30$
Modérée	$0,06 \leq \eta^2 < 0,14$	$0,50 \leq d < 0,80$	$0,30 \leq r < 0,50$
Forte	$\eta^2 \geq 0,14$	$d \geq 0,80$	$r \geq 0,50$

3. RÉSULTATS

Les informations personnelles pour chaque groupe sont données dans le Tableau 8. Il n'y a pas de différence significative entre les variables.

Tableau 8. Caractéristiques personnelles des participants (étude 3)

	SWITCH (*n* = 23)	**EM2I** (*n* = 38)	**VÉLO-JV** (*n* = 29)	***p***
Âge (années)	69,39 (6,42)	68,26 (5,53)	71,17 (5,34)	0,124
IMC (kg/m^2)	25,09 (4,94)	24,08 (3,33)	24,45 (2,59)	0,572
QAPPA[1] (MET/semaine)	877,39 (712,01)	1008,95 (683,62)	857,93 (705,43)	0,632
Sexe (% femmes)	82,61	76,32	86,21	0,578
Aucune pratique d'exergames dans la vie (%)	60,87	81,58	75,86	0,194
Pratique d'exergames dans l'année (%)				0,744
- Plus d'une fois par semaine	0	0	0	
- Entre une fois par semaine et une fois par mois	0	2,63	0	
- Entre une fois par mois et une fois dans l'année	13,04	10,53	6,90	
- Jamais	86,96	86,84	93,10	

Note. *EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; kg : kilogramme ; m : mètre ; MET : Metabolic Equivalent of Task ; n : nombre ; SWITCH : exergames assistés par une console Nintendo Switch ; VÉLO-JV : Vélo-Jeux vidéo.*

3.1. Expérience utilisateur

L'UX, intégrant les qualités pragmatiques, hédoniques-stimulation, hédoniques-identité et l'attractivité totale de chaque groupe est renseignée dans la Figure 25.

[1] Le niveau d'activité est considéré comme modéré si le participant a fait soit : i) au moins 150 minutes d'activité physique modérée, vigoureuse, ou les deux mélangées (ce qui correspond à 600 MET) dans 3 jours différents ou plus sur la semaine, ou ii) au moins 800 MET d'activité physique vigoureuse, modérée, ou les deux mélangées, dans 2 jours différents sur la semaine.

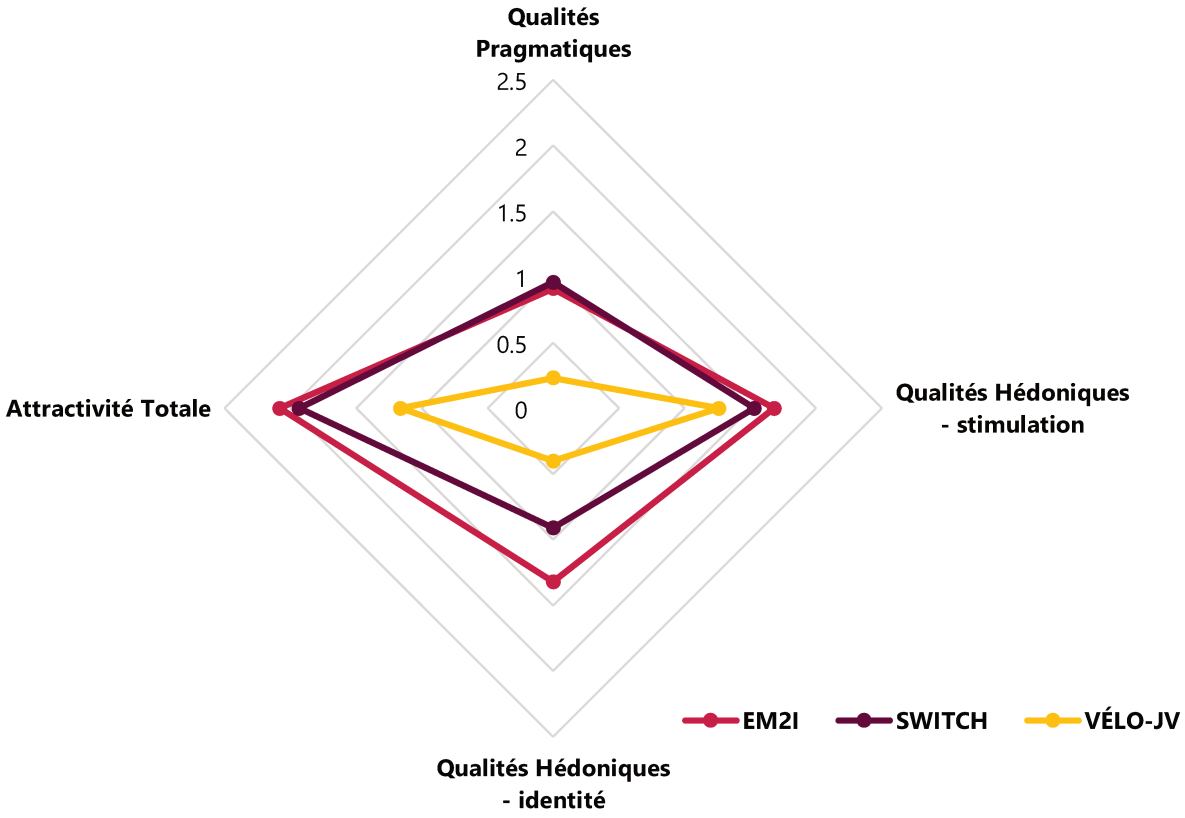


Figure 25. Expérience utilisateur en fonction des groupes (étude 3)

Note. *EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; SWITCH : exergames assistés par une console Nintendo Switch ; VÉLO-JV : Vélo-Jeux vidéo.*

Comparaison au seuil. La zone positive des éléments AttrakDiff2 se situe entre 3 et 1, la neutre entre 1 et -1, et la négative entre -1 et -3. Afin de déterminer si les scores sont significativement positifs, un test *t* de Student (test *t* pour un échantillon) est effectué pour comparer les moyennes des quatre éléments AttrakDiff2 avec une valeur théorique de 1 pour chaque groupe (Tableau 9).

- Le score de qualités pragmatiques est significativement inférieur à 1 pour VÉLO-JV ($t(28) = -3{,}79$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}70$).
- Le score de qualités hédoniques-stimulation est significativement supérieur à 1 pour EM2I ($t(37) = 5{,}18$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}84$) et SWITCH ($t(22) = 2{,}49$, $p = 0{,}021$, $d = 0{,}52$).
- Le score de qualités hédoniques-identité est significativement supérieur à 1 pour EM2I ($t(37) = 2{,}90$, $p = 0{,}006$, $d = 0{,}47$) et significativement inférieur à 1 pour VÉLO-JV ($t(28) = -2{,}66$, $p = 0{,}013$, $d = 0{,}49$).
- Le score d'attractivité totale est significativement supérieur à 1 pour EM2I ($t(37) = 8{,}44$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}37$) et SWITCH ($t(22) = 3{,}78$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}79$).

Tableau 9. Différences des scores d'expérience utilisateur avec la norme 1 (étude 3)

	Moyenne	*ET*	*t*	*p*	*d*
EM2I					
Qualités pragmatiques (score)	0,91	0,89	-0,65	0,522	0,10
Qualités hédoniques-stimulation (score)	1,68	0,81	5,18	**< 0,001**	**0,84**
Qualités hédoniques-identité (score)	1,32	0,69	2,90	**0,006**	**0,47**
Attractivité totale (score)	2,08	0,79	8,44	**< 0,001**	**1,37**
SWITCH					
Qualités pragmatiques (score)	0,96	0,79	-0,22	0,824	0,05
Qualités hédoniques-stimulation (score)	1,53	1,01	2,49	**0,021**	**0,52**
Qualités hédoniques-identité (score)	0,91	0,89	-0,47	0,645	0,10
Attractivité totale (score)	1,93	1,17	3,78	**0,001**	**0,79**
VÉLO-JV					
Qualités pragmatiques (score)	0,23	1,09	-3,79	**< 0,001**	**0,70**
Qualités hédoniques-stimulation (score)	1,26	0,92	1,52	0,139	0,28
Qualités hédoniques-identité (score)	0,40	1,22	-2,66	**0,013**	**0,49**
Attractivité totale (score)	1,16	1,85	0,47	0,640	0,09

Note. *ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; SWITCH : exergames assistés par une console Nintendo Switch ; VÉLO-JV : Vélo-Jeux Vidéo.*

Comparaison entre les groupes. L'analyse ANOVA révèle un effet significatif du groupe pour trois éléments : qualités pragmatiques ($F(2, 87) = 5{,}45$, $p = 0{,}006$, $\eta^2 = 0{,}11$), qualités hédoniques-identité ($F(2, 64{,}78) = 7{,}53$, $p = 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}16$), et attractivité totale ($F(2, 56{,}28) = 3{,}99$, $p = 0{,}024$, $\eta^2 = 0{,}09$). Il n'y a pas d'effet significatif de groupe pour le score qualités hédoniques-stimulation ($F(2, 87) = 1{,}78$, $p = 0{,}175$, $\eta^2 = 0{,}04$). L'analyse post hoc indique que :

- Pour le score qualités pragmatiques, il est significativement meilleur pour SWITCH que pour VÉLO-JV ($t(51) = 2{,}79$, $p = 0{,}017$, $d = 0{,}78$, IC 95 % [0,11 ; 1,36] pour la différence de moyennes), et pour EM2I que pour VÉLO-JV ($t(66) = 2{,}92$, $p = 0{,}012$, $d = 0{,}72$, IC 95 % [0,12 ; 1,23] pour la différence de moyennes).
- Pour le score qualités hédoniques-identité, il est significativement meilleur pour EM2I que pour VÉLO-JV ($t(41{,}45) = 3{,}67$, $p = 0{,}002$, $d = 0{,}99$, IC 95 % [0,37 ; 1,48] pour la différence de moyennes).
- Pour le score d'attractivité totale, il est significativement meilleur pour EM2I que pour VÉLO-JV ($t(35{,}73) = 2{,}49$, $p = 0{,}045$, $d = 0{,}70$, IC 95 % [0,15 ; 1,69] pour la différence de moyennes).

Les scores relatifs au plaisir perçu, au RTLX, à l'échelle de Borg modifiée et à l'intensité de la session sont fournis dans le Tableau 10.

Tableau 10. Scores de plaisir perçu, charge de travail et intensités physiques (étude 3)

	SWITCH	EM2I	VÉLO-JV	*p*	η^2
Plaisir perçu (score)	60,48 (8,93)[b]	60,71 (6,04)[a]	52,72 (11,67)[a,b]	**0,002**[+]	**0,15**
Charge de travail (score)	54,46 (18,54)	53,46 (14,28)	59,14 (16,36)	0,341	0,02
Exigence mentale (score)	62,39 (23,25)	63,16 (25,80)	75,00 (18,03)	0,068	0,06
Exigence physique (score)	60,65 (23,47)	62,37 (26,65)	51,72 (29,74)	0,257	0,03
Exigence temporelle (score)	63,26 (24,24)	64,47 (23,79)	61,72 (23,19)	0,895	0,00
Effort (score)	56,96 (22,50)	57,63 (22,50)	57,07 (23,59)	0,992	0,00
Performance (score)[1]	44,78 (24,47)	39,74 (16,52)[a]	54,66 (25,46)[a]	**0,035**[+]	**0,08**
Frustration (score)	38,70 (31,70)	33,42 (23,11)[a]	54,66 (27,48)[a]	**0,007**	**0,11**
Intensités					
Moyenne subjective (score)	3,83 (1,11)	4,37 (1,55)[a]	3,45 (1,11)[a]	**0,032**	**0,08**
Moyenne objective (% de la FCMT)	68,01 (8,20)	69,64 (9,11)[a]	63,41 (8,95)[a]	**0,018**	**0,09**
Maximale objective (% de la FCMT)	86,37 (11,59)[b]	88,01 (10,98)[a]	73,05 (8,83)[a,b]	**< 0,001**	**0,30**

Note. *EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; FCMT : Fréquence Cardiaque Maximale Théorique ; SWITCH : exergames assistés par une console Nintendo Switch ; VÉLO-JV : Vélo-Jeux vidéo ;* [a] *: différence significative entre EM2I et VÉLO-JV en post hoc ;* [b] *: différence significative entre SWITCH et VÉLO-JV en post hoc.*
[1]*La dimension « performance » du RTLX est inversée (0 = très forte à 100 = très faible), comparativement aux 5 autres dimensions.* [+]*L'hypothèse d'égalité des variances est violée donc la correction de Brown-Forsythe est appliquée afin de compenser l'hétérogénéité des variances.*

3.2. Plaisir perçu

Un effet significatif de groupe est observé ($F(2, 62{,}62) = 7{,}10$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}15$) pour le plaisir perçu. L'analyse post hoc révèle une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV ($t(39{,}37) = 3{,}36$, $p = 0{,}005$, $d = 0{,}90$, IC 95 % [2,74 ; 13,23] pour la différence de moyennes) ainsi qu'entre SWITCH et VÉLO-JV ($t(49{,}95) = 2{,}71$, $p = 0{,}024$, $d = 0{,}87$, IC 95 % [1,82 ; 13,69] pour la différence de moyennes).

3.3. Charge de travail de la session

La charge de travail de la session, évaluée à l'aide de la RTLX, est correcte (entre 53,46 et 59,14 sur 100), sans différence significative pour les trois groupes. Les trois dimensions liées à la tâche (i.e., exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle) sont équilibrées, tandis que la frustration est la dimension la plus faible, sauf pour VÉLO-JV, où la frustration est plus élevée. Sur cet item, un effet significatif de groupe est observé ($F(2, 87) = 5{,}30$, $p = 0{,}01$, $\eta^2 = 0{,}11$), et le test post hoc révèle une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV ($t(87) = -3{,}20$, $p = 0{,}005$, $d = 0{,}79$, IC 95 % [5,41 ; 37,06] pour la différence de moyennes). Un effet significatif de groupe est constaté pour le score de performance ($F(2, 65{,}51) = 3{,}54$, $p = 0{,}035$, $\eta^2 = 0{,}08$). Le test post hoc indique une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV ($t(45{,}34) = -2{,}75$, $p = 0{,}023$, $d = 0{,}68$, IC 95 % [2,09 ; 27,75] pour la différence de moyennes).

3.4. Intensité physique

L'intensité subjective est comprise entre très facile et facile pour SWITCH et VÉLO-JV, et entre facile et modérée pour EM2I. Un effet significatif de groupe est observé pour l'intensité subjective ($F(2, 87) = 3,58$, $p = 0,032$, $\eta^2 = 0,08$). L'intensité du groupe EM2I est significativement supérieure à celle du groupe VÉLO-JV ($t(87) = 2,64$, $p = 0,026$, $d = 0,65$, IC 95 % [0,09 ; 1,75] pour la différence de moyennes). L'intensité physique objective est modérée pour les trois groupes, mais un effet significatif de groupe est observé ($F(2, 87) = 4,22$, $p = 0,018$, $\eta^2 = 0,09$) pour l'intensité moyenne. Le test post hoc montre une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV ($t(66) = 2,86$, $p = 0,015$, $d = 0,70$, IC 95 % [1,04 ; 11,43] pour la différence de moyennes).

L'intensité physique objective maximale est considérée comme élevée pour les trois groupes. Un effet significatif de groupe est observé ($F(2, 87) = 18,50$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,30$). Le test post hoc montre une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV ($t(87) = 5,78$, $p < 0,001$, $d = 1,42$, IC 95 % [8,78 ; 21,14] pour la différence de moyennes) et entre SWITCH et VÉLO-JV ($t(87) = 4,54$, $p < 0,001$, $d = 1,27$, IC 95 % [6,33 ; 20,32] pour la différence de moyennes).

3.5. Intention de continuer à jouer à des exergames

Dans les trois groupes, la majorité des participants souhaite continuer : 84 % – 32 sur 38 – pour EM2I (58 % tout à fait d'accord, 26 % d'accord), 65 % – 15 sur 23 – pour SWITCH (43 % tout à fait d'accord, 21 % d'accord). Cependant, ces chiffres sont plus faibles pour VÉLO-JV avec 59 % – 17 sur 29 – (21 % tout à fait d'accord, 38 % d'accord). Une proportion non négligeable n'est pas d'accord (17 %) ou pas du tout d'accord (14 %) pour le groupe VÉLO-JV.

3.6. Corrélations entre les variables

Les corrélations entre les mesures sont indiquées dans le Tableau 11. Le plaisir perçu est fortement corrélé à l'UX ($r = 0,66$, $p < 0,001$) et faiblement à l'intensité moyenne ($r = 0,29$, $p = 0,005$). La corrélation entre l'intensité moyenne et l'UX est également faible ($r = 0,23$, $p = 0,028$).

Tableau 11. Corrélations entre l'attractivité totale, le plaisir perçu, la charge de travail, l'intensité subjective, et l'intensité moyenne et maximale (étude 3)

	Attractivité totale	Plaisir perçu	RTLX	Borg modifié	Intensité moyenne	Intensité maximale
Attractivité totale						
Plaisir perçu	**0,66*** **					
RTLX	-0,17	0,03				
Borg modifié	-0,02	0,03	0,19			
Intensité moyenne	**0,23***	**0,29****	-0,05	-0,07		
Intensité maximale	**0,30****	**0,37*** **	-0,13	0,07	**0,86*** **	

Note. *RTLX : Raw Task Load Index.* ***** *: p < 0,05,* ****** *p < 0,01,* ******* *: p < 0,001.*

Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent au r de Pearson.

Taille d'effet faible (0,10 ≤ r < 0,30)

Taille d'effet modérée (0,30 ≤ r < 0,50)

Taille d'effet forte (r ≥ 0,50)

4. DISCUSSION

Cette étude visait à comparer trois expériences globales d'exergames (i.e., EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) chez les personnes âgées. Concernant l'UX, l'attractivité totale, définie comme la valeur globale du produit, basée sur la perception de ses qualités pragmatiques et hédoniques, est positive pour EM2I et SWITCH. En effet, les recherches suggèrent que les exergames peuvent rendre l'exercice agréable et stimulant (Valenzuela et al., 2018). Grâce à un retour visuel et auditif instantané ainsi qu'à des messages motivationnels (bonus, encouragements), ces jeux favorisent une expérience interactive et ludique (Agmon et al., 2011). Cependant, l'attractivité globale n'est pas positive pour les trois expériences puisqu'elle est neutre pour le groupe VÉLO-JV, avec une différence significative par rapport à EM2I. Selon Lallemand et Gronier (2015), cette neutralité n'a pas d'impact négatif, car elle signifie que le produit atteint son objectif sans provoquer d'effet indésirable. Cette différence entre les deux autres groupes (EM2I et VÉLO-JV) peut s'expliquer par la combinaison de la stimulation physique/motrice et cognitive, plus naturelle pour EM2I et SWITCH que pour VÉLO-JV. Pour ce dernier, la tâche physique (i.e., pédaler) n'est pas directement liée à la tâche cognitive (i.e., jeux vidéo), impliquant une tâche additionnelle (*Thinking While Moving*) pouvant créer un exercice moins instinctif et écologique. En revanche, EM2I et SWITCH impliquent des tâches incorporées (*Moving While Thinking*), potentiellement

plus simple à réaliser, surtout dans un contexte où la plupart des participants de cette étude vivent leur première expérience d'exergames.

La distinction des stimulations incorporée et additionnelle pourrait expliquer la raison pour laquelle le groupe VÉLO-JV, un entraînement additionnel, obtient un score élevé sur l'échelle d'« exigence mentale » de la charge de travail (75/100) par rapport aux deux autres entraînements incorporés (62,39/100 pour le groupe SWITCH et 63,16/100 pour le groupe EM2I), bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les groupes. Par ailleurs, la différence d'attractivité totale observée entre les groupes pourrait également être partiellement liée à la dimension sociale des jeux : VÉLO-JV (*New Super Mario Bros. U Deluxe*) est effectué en mode solo, tandis que SWITCH et EM2I offrent des expériences multi-joueurs, favorisant les interactions sociales entre les participants.

En outre, le type de contrôleur utilisé pourrait expliquer cette distinction, reflétée par les différences dans le score de qualités pragmatiques. Celui-ci exprime la capacité perçue des utilisateurs à interagir avec un produit pour manipuler leur environnement et atteindre leurs objectifs. Les qualités pragmatiques sont neutres pour les trois groupes, mais le score de VÉLO-JV est significativement plus faible que ceux d'EM2I et SWITCH. Pour VÉLO-JV, l'utilisation d'un contrôleur à boutons peut s'avérer complexe, alors que pour EM2I, le corps ainsi que le ballon servent directement de contrôleur, tandis qu'il est mixte (gestes et boutons) pour le groupe SWITCH. L'apprentissage de l'utilisation d'un contrôleur à boutons peut exiger un effort supplémentaire (Pham & Theng, 2012), susceptible d'altérer l'UX. Effectivement, l'étude de Pham et Theng (2012) a révélé que les participants âgés préféraient jouer avec des interfaces nécessitant peu ou pas d'interactions avec un dispositif de contrôle. Le contrôleur gestuel (*Kinect*), demandant davantage de mouvements physiques, a obtenu le score d'attractivité totale le plus élevé, tandis que le contrôleur à boutons (*Xbox 360* avec une manette classique), impliquant moins d'engagement corporel, a reçu une évaluation plus négative. La difficulté d'utilisation des boutons pourrait ainsi expliquer le score de qualités pragmatiques plus faible du groupe VÉLO-JV et, par conséquent, générer davantage de frustration et de moins bonnes performances par rapport aux contrôleurs corporels ou mixtes (boutons et gestes). En effet, le groupe VÉLO-JV présente un score de frustration plus élevé au questionnaire NASA-TLX que le groupe EM2I, de même qu'un sentiment inférieur de performance. Cependant, le score global de charge de travail est tout de même adéquat pour les trois groupes, sans différence significative, et il n'y a pas de corrélation entre l'attractivité totale et la charge de travail. Pour compléter cette réflexion, une analyse corrélationnelle entre les qualités pragmatiques et les différentes dimensions du NASA-TLX serait pertinente.

Les exergames ont le potentiel de réduire la solitude, de renforcer les liens sociaux et de favoriser des attitudes positives envers autrui (J. Li et al., 2018). Ils offrent également des opportunités d'engagement avec les pairs et les membres de la famille (Agmon et al., 2011). Dans la présente étude, cet impact social se reflète par le score positif du groupe EM2I pour les qualités hédoniques-identité, qui évaluent la capacité d'un produit à soutenir une fonction sociale et à communiquer une identité spécifique à l'utilisateur. Le format multijoueur de l'EM2I, qui se situe à l'extrémité du continuum d'interaction (voir partie 1.1.4 du chapitre 4 du cadre théorique), encourage les échanges et une communication accrue entre les participants. À l'inverse, le groupe VÉLO-JV, où les participants jouent seuls (à plusieurs dans la même pièce), obtient un score neutre, significativement plus faible que celui d'EM2I. De plus, les groupes SWITCH et EM2I répondent au besoin de stimulation grâce à des contenus nouveaux, attrayants et stimulants, comme en témoigne leur score positif de qualités hédoniques-stimulation. En revanche, le score du groupe VÉLO-JV est neutre, mais aucune différence significative n'est relevée entre les groupes. Il est possible que la monotonie de l'expérience VÉLO-JV, qui ne propose qu'un seul jeu, limite son potentiel de stimulation par rapport à celles des groupes SWITCH et EM2I, qui offrent une plus grande variété de jeux.

L'intensité est modérée pour les trois groupes, située entre 50 % et 70 % de la fréquence cardiaque maximale, et atteignant quasiment un niveau élevé pour les groupes EM2I et SWITCH. Ces valeurs respectent les recommandations pour entraîner une amélioration de la santé cardio-respiratoire et cognitive chez les personnes âgées (Audiffren et al., 2011 ; Swain et al., 2012). Ainsi, ces trois exergames pourraient être intégrés dans un programme d'entraînement visant à améliorer les dimensions corporelle et cognitive. Cependant, l'intensité physique est significativement plus élevée pour EM2I que pour VÉLO-JV. Cette différence peut s'expliquer par les sollicitations physique et motrice propres à EM2I : l'entraînement multi-domaine mobilise l'ensemble du corps et la liberté de mouvement offerte par le système peut augmenter l'intensité, comme l'ont démontré Martin-Niedecken et al. (2019) avec l'ExerCube. De plus, l'entraînement incorporé peut accroître l'intensité puisqu'il est impossible de prioriser la dimension corporelle ou cognitive, et de réduire l'engagement physique au profit de la stimulation cognitive. D'un point de vue subjectif, l'intensité est perçue comme très facile pour SWITCH et VÉLO-JV, et facile à modérée pour EM2I, avec une différence significative entre EM2I et VÉLO-JV. La stimulation physique, qui est intermittente pour EM2I et SWITCH et continue pour VÉLO-JV, peut expliquer ces différences. Cela se reflète d'ailleurs par les écarts d'intensité maximale entre les groupes, VÉLO-JV ayant une intensité maximale plus faible que EM2I et SWITCH (respectivement 14,96 % et 13,33 % de différence). Par ailleurs, les intensités objective et subjective ne sont pas corrélées, indiquant que les exergames peuvent induire une perception de l'effort différente de l'intensité réelle. Cela

constitue un avantage intéressant, en particulier pour les personnes âgées peu habituées à pratiquer de l'activité physique.

Comme l'indiquent de nombreuses études ainsi que les résultats de ce travail, le plaisir généré par les exergames est élevé (e.g., Rebsamen et al., 2019 ; Schoene et al., 2013 ; Soltani et al., 2020 ; Valenzuela et al., 2018 ; Vaziri et al., 2016). De plus, il est significativement corrélé aux intensités moyenne et maximale confirmant la suggestion de Lyons et al. (2014) qui indique que le plaisir pourrait influencer l'énergie dépensée (et donc l'intensité d'effort) lors d'une session d'exergames. Ainsi, chez les personnes âgées en particulier, le plaisir ressenti lors de la pratique d'exergames joue un rôle crucial. Dans cette étude, le plaisir est significativement plus élevé pour EM2I et SWITCH que pour VÉLO-JV. Ainsi, certains exergames génèrent plus de plaisir que d'autres, selon leur interface, mais également en fonction des interactions entre les joueurs. Comme l'ont souligné Caserman et al. (2020), l'interaction sociale, qui fait partie des nombreuses qualités requises pour un jeu, a un rôle important dans l'amélioration du plaisir. Concernant l'interface, Kim et al. (2014) ont montré que le niveau d'interaction du corps de l'utilisateur avec le jeu (*user interface embodiment*) influence le niveau de plaisir chez les jeunes adultes (âge moyen = 24,39 ans). Ils ont comparé trois niveaux : i) faible, les participants recevaient un feedback vidéo de leurs mouvements sans interaction directe avec le jeu, ii) modéré, les participants bénéficiaient d'un feedback vidéo, d'une détection de mouvement d'une partie du corps, ainsi que d'un signal sonore pour indiquer la réussite des mouvements, iii) élevé, les participants interagissaient avec un avatar intégré, utilisaient une détection de mouvement de tout le corps, et recevaient un feedback sonore sous forme de voix humaine pour guider l'exercice. Les résultats indiquent qu'un niveau élevé d'interaction du corps de l'utilisateur avec le jeu procurait significativement plus de plaisir que les deux autres.

Concernant la compliance potentielle à long terme, cette étude suggère une variabilité en fonction des types d'exergames. Bien que la majorité des participants aient exprimé le souhait de poursuivre la pratique, cette intention est nettement plus marquée pour EM2I (84 %) que pour SWITCH (65 %) et, surtout, pour VÉLO-JV (59 %). Cela reflète les résultats précédemment présentés, notamment une UX et un plaisir perçus comme plus élevés pour EM2I et SWITCH, ainsi qu'un entraînement incorporé plus intuitif. À l'inverse, VÉLO-JV, repose sur un entraînement additionnel, s'avère moins engageant sur le plan social et génère une frustration plus importante. Ces éléments pourraient freiner l'envie de s'engager dans un programme plus long. Toutefois, avec un apprentissage progressif sur plusieurs séances, l'utilisation des boutons et le format d'entraînement additionnel pourraient devenir plus accessibles aux personnes âgées.

Les caractéristiques individuelles des participants peuvent influencer leur expérience. Dans cette étude, aucune différence n'a été observée en fonction de l'âge, de l'IMC, du niveau d'activité physique et d'éducation, du genre et de l'expérience préalable avec les exergames. Bien que la majorité des participants (61 à 82 % selon le groupe) n'ait jamais joué à des exergames, les préférences et profils des joueurs pourraient néanmoins influencer l'UX, le plaisir perçu ou l'intensité physique. Cet aspect n'a pas été exploré dans cette étude. De plus, les participants n'ont pas été randomisés aléatoirement, mais naturellement, selon des contraintes logistiques (i.e., lieux, période). À notre connaissance, cette étude est la première à comparer trois expériences d'exergames chez les personnes âgées, ce qui limite les possibilités de comparaison avec la littérature existante. En effet, les études antérieures comparent généralement seulement deux dispositifs (J. Li et al., 2021), ou, lorsqu'elles en comparent trois, les sessions sont souvent très brèves (i.e., quelques minutes) (Thin et al., 2013), peu représentatives d'un usage réel.

Les résultats de cette étude mettent en évidence que les exergames incorporés (*Moving While Thinking*), comme EM2I et SWITCH, sont associés à une meilleure UX, une intensité physique plus élevée, et un plaisir plus important que les exergames additionnels (*Thinking While Moving*), représentés par VÉLO-JV. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de la stimulation cognitive à l'activité physique, ainsi que le potentiel d'interaction des participants dans le jeu, peuvent participer à un engagement à long terme des participants. Dans cette perspective, l'étude 4 s'inscrit comme une suite logique, avec pour objectif d'évaluer les effets à moyen terme (12 semaines) de ces différents programmes d'exergames sur les fonctions physiques, motrices, cognitives et de DT. Elle vise notamment à comparer les effets de certains exergames incorporés (i.e., EM2I, SWITCH) à ceux d'un exergame additionnel (i.e., VÉLO-JV), afin de déterminer quels formats sont les plus adaptés et efficaces pour un vieillissement en bonne santé.

ÉTUDE 4 – EFFETS À COURT TERME DE L'ENTRAÎNEMENT SIMULTANÉ SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES ET EN DOUBLE-TÂCHE CHEZ LES PERSONNES ÂGÉES : LE PROJET GAMAGE

1. OBJECTIFS

En utilisant une méthodologie interventionnelle, l'étude principale de cette thèse vise à comparer les effets physiques, moteurs, cognitifs et de DT, de l'entraînement combinant stimulation physique/motrice et cognitive, et plus particulièrement l'entraînement simultané à ceux de modalités uniques (i.e., entraînement physique, entraînement cognitif) auprès de personnes âgées. Comme évoqué précédemment dans le chapitre 3 du cadre théorique, les recherches portant sur l'entraînement combiné se multiplient et mettent en évidence des effets généralement positifs sur les fonctions physiques, motrices et cognitives des personnes âgées (e.g., Gavelin et al., 2021 ; Zhu et al., 2016). En revanche, les résultats sont plus contrastés et hétérogènes lorsqu'il s'agit de comparer l'entraînement combiné aux entraînements physique ou cognitif seuls (Gavelin et al., 2021 ; Wollesen et al., 2020 ; Yen & Chiu, 2021 ; Zhu et al., 2016). Ces méta-analyses déplorent le manque d'études de qualité et soulignent la nécessité de mettre en place des études interventionnelles complètes, permettant de comparer rigoureusement ces différents groupes (entraînement combiné, physique, cognitif, contrôle) entre eux. Par ailleurs, elles expliquent en partie l'hétérogénéité de leurs résultats par l'absence de différenciation des modalités d'entraînement combiné, notamment leur temporalité (i.e., simultanée, séquentielle) ainsi que leurs composantes, celles-ci pouvant générer des effets distincts.

L'entraînement combiné peut être effectué de manière séquentielle (i.e., les tâches cognitive et physique et/ou motrice sont réalisées l'une après l'autre) ou simultanée (i.e., les tâches sont réalisées en même temps). Dans cette étude, seul l'entraînement combiné simultané est analysé, en raison de ses avantages théoriques et pratiques par rapport à l'entraînement séquentiel [i.e., gain de temps, effets synergiques potentiels sur une durée restreinte (Fissler et al., 2013)], ainsi que sur la base des résultats empiriques comparant ces deux approches (Gheysen et al., 2018 ; Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022) (voir partie 3.1 du chapitre 4 du cadre théorique pour une comparaison détaillée). Plus précisément, cette étude s'appuie sur le modèle proposé par Herold et al. (2018), qui divise l'entraînement simultané

en deux catégories, selon la manière dont la tâche cognitive est intégrée à la tâche motrice[1] (i.e., additionnelle, *Thinking While Moving* ; incorporée, *Moving While Thinking*). Ce modèle suppose une supériorité de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel pour améliorer les capacités cognitives, mais cette question reste très peu documentée et ne montre généralement pas de différence sur les capacités motrices et cognitives des personnes âgées (Eggenberger et al., 2015 ; Teraz et al., 2022) (études détaillées dans la partie 3.2.2 du chapitre 4). Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer les effets de l'entraînement combiné simultané incorporé, comparativement à l'additionnel.

Enfin, cette étude cherche également à approfondir le modèle d'Herold et al. (2018) en comparant différentes modalités d'entraînement incorporé, notamment à travers l'utilisation d'environnements naturels et virtuels. Les environnements virtuels de cette étude sont effectués avec des exergames, qui représentent aujourd'hui la méthode d'entraînement incorporé la plus utilisée (Teraz et al., 2022), notamment en raison de leur caractère ludique et de leurs effets bénéfiques auprès des personnes âgées (Stanmore et al., 2017). Deux types d'exergames incorporés sont utilisés dans cette étude : des exergames commerciaux, ici la *Switch* (*Nintendo*), et une nouvelle génération d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I), dans cette étude *Neo One* (*NeoXperiences*)[2]. La *Wii*, puis la *Switch*, ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis les années 2010 [e.g., 8 des 12 études incluses dans la méta-analyse de Pacheco (2020)] montrant leurs bénéfices sur les capacités physiques, motrices et cognitives des personnes âgées (voir partie 4.2 du chapitre 4 du cadre théorique présentant leurs intérêts et leurs limites). Par ailleurs, les EM2I pourraient dépasser certaines limites des exergames commerciaux (e.g., intensité plus élevée, mobilisation motrice complexe, interactions sociales multiples). Ainsi, notre équipe de recherche (Béraud-Peigné et al., 2024) a montré qu'un programme d'EM2I de 3 mois (2 séances d'1h par semaine) permettait d'améliorer les capacités physiques et motrices (i.e., force du bas du corps, souplesse, équilibre, capacités aérobies) de manière similaire à un programme d'entraînement physique (marche et renforcement musculaire) et générait des bénéfices cognitifs similaires sur certaines capacités cognitives (i.e., mémoire visuospatiale à court terme), supérieurs sur d'autres fonctions cognitives (i.e., mémoire de travail visuospatiale, inhibition) ainsi que sur la DT cognitivo-motrice. Cependant, il n'existe pas d'étude à ce jour comparant les effets d'un programme d'EM2I à un exergame commercial.

[1] Ici le terme « tâche motrice » est employé pour reprendre la terminologie d'Herold et al. (2018). Toutefois, dans le cadre de cette étude, il peut s'agir d'une tâche motrice mais également d'une tâche physique.

[2] Pour une description plus détaillée, voir partie 1 et 2.2 de l'étude 3 et partie 2.3 (les programmes) de cette étude.

La majorité des travaux étudiant l'entraînement incorporé utilisent des environnements virtuels et notamment des exergames. Par ailleurs, l'entraînement incorporé peut également être réalisé dans un environnement naturel, qui pourrait être plus adapté à ce public (e.g., absence d'anxiété technologique, familiarité avec l'environnement, absence de surcharge cognitive). Dans cette étude, un entraînement multi-domaine, basé sur des Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C) utilisant des exercices de coopération et d'opposition, est également comparé aux exergames.

Pour répondre à l'ensemble de ces objectifs, cette étude présente plusieurs originalités visant à soulever les limites identifiées dans les travaux antérieurs. Elle propose un protocole expérimental complet qui inclut quatre programmes simultanés, dont trois incorporés qui se distinguent par leur complexité et leur rapport à la technologie [Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C), exergames assistés par une console grand public (SWITCH), Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I)]. Un dernier groupe simultané pédale sur un vélo tout en jouant à un Jeu Vidéo sans lien moteur direct (VÉLO-JV). Le protocole comprend également deux groupes contrôles actifs, l'un faisant uniquement du vélo (VÉLO), l'autre jouant uniquement à un Jeu Vidéo (JV), ainsi qu'un groupe contrôle inactif.

L'expérience globale des exergames a été testée en amont, sur une session unique, afin d'optimiser la conception du protocole de cette étude (e.g., évaluation de la charge de travail dans une perspective de conception de programme, connaissances des intensités physiques et cognitives) et de s'assurer qu'ils étaient adaptés pour une utilisation auprès de personnes âgées (étude 3), puisque deux des trois exergames utilisés (VÉLO-JV, EM2I), ne l'avaient encore jamais été auprès de ce public. De plus, cette étude évalue aussi bien les capacités physiques, motrices que cognitives, ce qui reste encore rare dans la littérature. Elle intègre également une évaluation de la performance en DT et de la coordination, deux dimensions encore peu explorées. Pour l'évaluation, des tests classiques (e.g., *Trail Making Test*, test de Corsi) sont employés, complétés par des outils spécifiquement développés dans un objectif de conception de mesures plus précises et écologiques (études 1 et 2). Enfin, cette étude se distingue par le suivi post-programme des participants permettant ainsi d'observer les effets de rétention, dont les résultats sont présentés dans l'étude 5.

Quatre questions principales sont testées concernant les effets physiques, moteurs, cognitifs et de DT : 1) L'entraînement simultané est-il plus efficace qu'un entraînement physique ou cognitif ? 2) L'entraînement incorporé génère-t-il des effets distincts de l'entraînement additionnel ? 3) Tous les entraînements incorporés sont-ils équivalents en termes d'efficacité ? 4) Les entraînements simultanés sont-ils plus efficaces lorsqu'ils sont réalisés dans un environnement virtuel plutôt que naturel ?

Au niveau physique, il est attendu que les effets de l'entraînement simultané soient équivalents à ceux de l'entraînement physique, et supérieurs à ceux de l'entraînement cognitif. Les entraînements incorporés devraient améliorer davantage certaines capacités physiques et motrices, notamment les plus complexes au niveau moteur, comme la coordination, en raison de la nature des stimulations offertes par les entraînements (multi-domaines, cognitivo-motrices), comparativement à l'entraînement additionnel (cognitivo-physique). De plus, les deux entraînements multi-domaine (AM2C et EM2I) pourraient entraîner des bénéfices physiques et moteurs plus marqués. Enfin, il est attendu que l'entraînement simultané en environnement naturel soit plus efficace qu'en environnement virtuel, en raison des sollicitations motrices et physiques potentiellement plus réalistes et complètes.

Au niveau cognitif, selon la théorie de la facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013), il est attendu que l'entraînement simultané entraîne des effets supérieurs à ceux des entraînements physique et cognitif seuls. De plus, selon le modèle d'Herold et al. (2018), l'entraînement incorporé devrait être plus efficace que l'entraînement additionnel. Compte tenu de ses caractéristiques immersives et interactives, de son caractère multi-domaine et de son intensité modérée à élevée, l'EM2I est supposé être l'entraînement incorporé le plus efficace. Enfin, l'entraînement simultané en environnement virtuel pourrait être plus bénéfique qu'en environnement naturel, en raison de la richesse cognitive procurée par les environnements virtuels.

Concernant les capacités de DT, il est attendu que l'entraînement simultané produise des effets supérieurs à ceux des entraînements physique et cognitif, conformément à la théorie de la facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013). Par ailleurs, il est supposé que l'entraînement additionnel soit plus efficace que l'entraînement incorporé dans ce domaine, dans la mesure où l'évaluation des capacités de DT correspond à une logique de tâches additionnelles.

2. MÉTHODE

2.1. Population

Les participants potentiels ont été contactés par mail et à l'aide de flyers déposés dans des lieux publics. Ils devaient : a) être âgés de plus de soixante ans, b) pratiquer moins de 2 h 30 d'activité physique par semaine[1], c) être retraités, d) obtenir un score de 3 ou plus sur une échelle de santé subjective de type Likert en 5 points (1 = très mauvaise, 2 = mauvaise, 3 = normale, 4 = bonne, 5 = excellente), e) ne

[1] Ce critère a été choisi afin d'inclure uniquement des participants ne suivant pas les recommandations minimum de temps de pratique d'activités physiques.

pas présenter de pathologie majeure (e.g., cancer, maladie neurodégénérative, diabète), f) avoir une vision et une audition normales ou corrigées, g) ne pas avoir de restrictions fonctionnelles au niveau des épaules, coudes et poignets, h) ne pas jouer régulièrement aux jeux vidéo ou aux exergames, i) vivre de manière indépendante, j) avoir un score minimum de 27 au MMSE (Folstein et al., 1975). Les participants engagés dans un groupe incluant de l'activité physique devaient présenter un certificat médical de non-contre-indication à la pratique de l'activité physique. Un entretien téléphonique a d'abord été réalisé afin de vérifier que les volontaires remplissaient les critères d'inclusion de a) à i). Si c'était le cas, un rendez-vous en présentiel était fixé pour réaliser le MMSE, critère d'inclusion j). Si le score obtenu était supérieur ou égal à 27, les pré-tests étaient effectués.

Une analyse de puissance a été réalisée sur la base du principal test statistique prévu pour cette étude (ANOVA, 2 mesures répétées, interaction intra- et inter-sujets). Les paramètres utilisés étaient les suivants : f = 0,20, α = 0,05, puissance = 0,95, η^2 = 0,04. Cette estimation repose sur l'hypothèse d'un effet faible des différences d'évolution entre les groupes, conformément aux résultats de précédentes études sur l'entraînement combiné chez les personnes âgées, qui rapportent généralement des effets de faible taille (e.g., Eggenberger et al., 2015 ; Gavelin et al., 2021). Pour tester les principales hypothèses de cette étude, 133 participants étaient nécessaires. Afin de compenser d'éventuels abandons, 41 participants supplémentaires ont été inclus, soit un total de 174 participants.

2.2. Procédure

Le protocole a été approuvé par le Comité d'Éthique de la Recherche (CER) de l'Université Paris-Saclay (CER-Paris-Saclay-2022-090) qui a estimé qu'un Comité de Protection des Personnes (CPP) n'était pas nécessaire. De plus, le protocole de l'étude a été enregistré sur le site ClinicalTrials.gov (ID : NCT05991911). Les participants n'ont pas reçu de compensation financière.

Les participants de cette étude interventionnelle et multicentrique ont été répartis en sept groupes (i.e., EM2I, SWITCH, AM2C, VÉLO-JV, JV, VÉLO, GC, voir Figure 26) en fonction de leur localisation et de la période pendant laquelle ils intégraient l'étude, selon une logique d'allocation par grappes naturelles, plutôt qu'une randomisation individuelle. Ainsi, chaque grappe correspond à une combinaison lieu/période/intervention. Les programmes ont été réalisés à différents endroits et périodes : i) Montreuil : EM2I et AM2C (février à mai 2023), ii) Créteil : SWITCH (septembre à décembre 2023), iii) Paris : VÉLO et VÉLO-JV (février à mai 2024), et JV (septembre à décembre 2024). L'étude a été conduite en condition de simple aveugle : les participants ne connaissaient pas à l'avance leur groupe, tandis que le chercheur en avait connaissance.

L'étude s'est déroulée sur 26 semaines pour chacun des participants, qui ont été évalués en pré-tests (semaine 1), ont suivi un programme de 12 semaines (semaines 2 à 13) et ont été de nouveau évalués en post-tests (semaine 14) et en tests de rétention (semaine 26). Les résultats incluant les tests de rétention sont indiqués en étude 5. La répartition des participants entre chaque groupe, ainsi que les abandons et les motifs de ces abandons sont présentés dans la Figure 26.

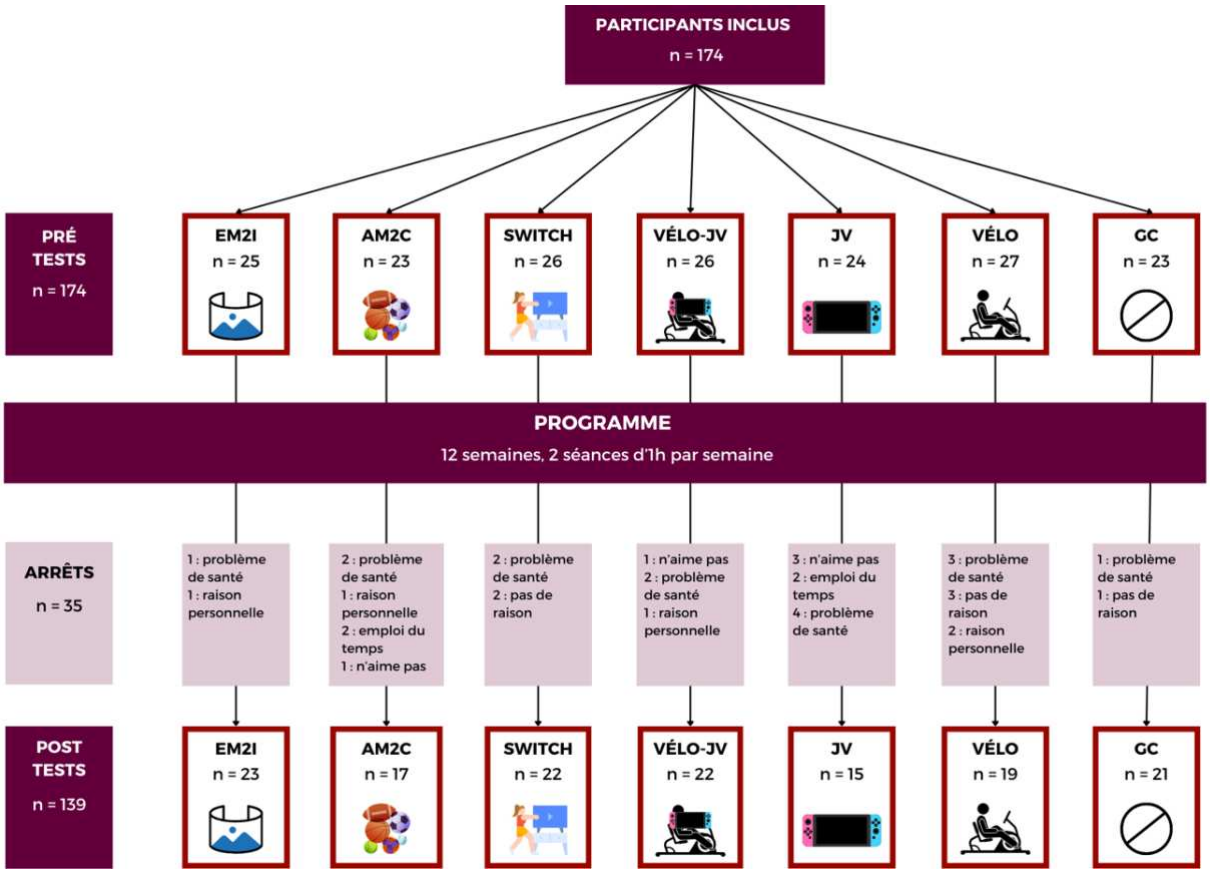


Figure 26. Répartition des participants, abandons et suivi à chaque étape de l'étude par groupe expérimental (étude 4)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; n : nombre ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

2.3. Les programmes

Cette étude se compose de 7 groupes, dont 6 programmes (Figure 27). Quatre programmes sont combinés (i.e., EM2I, AM2C, SWITCH, VÉLO-JV), dont 3 incorporés (i.e., EM2I, AM2C, SWITCH) et 1 additionnel (VÉLO-JV). Les deux autres programmes sont composés d'une seule principale modalité : physique (VÉLO) et cognitive (Jeux Vidéo, JV). Le dernier groupe est un Groupe Contrôle inactif (GC).

Figure 27. Classification des groupes en fonction du type d'intervention (étude 4)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public.*

Tous les programmes comprenaient deux séances collectives hebdomadaires (4 à 6 participants) d'une heure chacune, soit un total par programme de 24 séances sur 12 semaines. Les caractéristiques (i.e., modalités, stimulation, interactions, position corporelle, contrôleur, outil technologique, jeux) des programmes diffèrent. Elles sont décrites dans la Figure 28. Les séances ont été encadrées en alternance par trois EAPA distincts, l'ensemble des groupes a donc bénéficié de plusieurs intervenants dont le rôle consistait à expliquer et démontrer les exercices, assurer la sécurité des participants, adapter la difficulté des exercices en fonction de chaque participant, corriger les postures, encourager et fournir un retour. Les programmes intégrant de l'activité physique (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV, VÉLO) étaient structurés de la manière suivante : 10 minutes d'échauffement (5 minutes d'échauffement articulaire suivies de 5 minutes d'échauffement spécifique), 45 minutes de corps de séance, 5 minutes de retour au calme incluant des étirements. Le programme JV, quant à lui, était composé de 5 à 10 minutes d'explications suivies de 45 minutes de séance.

L'ensemble des programmes incluant une composante d'activité physique visait à atteindre une intensité au moins modérée. Cette intensité était vérifiée au cours des séances par l'EAPA, sans monitoring technologique, mais à l'aide d'indicateurs affectifs et physiologiques tels que l'observation de la respiration, de la couleur de la peau et de la vitesse de pédalage sur le vélo. En complément, un contrôle de l'intensité était réalisé à l'issue de chaque séance. Lorsque l'intensité mesurée était jugée insuffisante, les participants étaient encouragés à augmenter leur effort lors des séances suivantes. À l'inverse, aucune situation de surintensité n'a été observée : aucun participant n'a présenté un niveau d'effort jugé excessif.

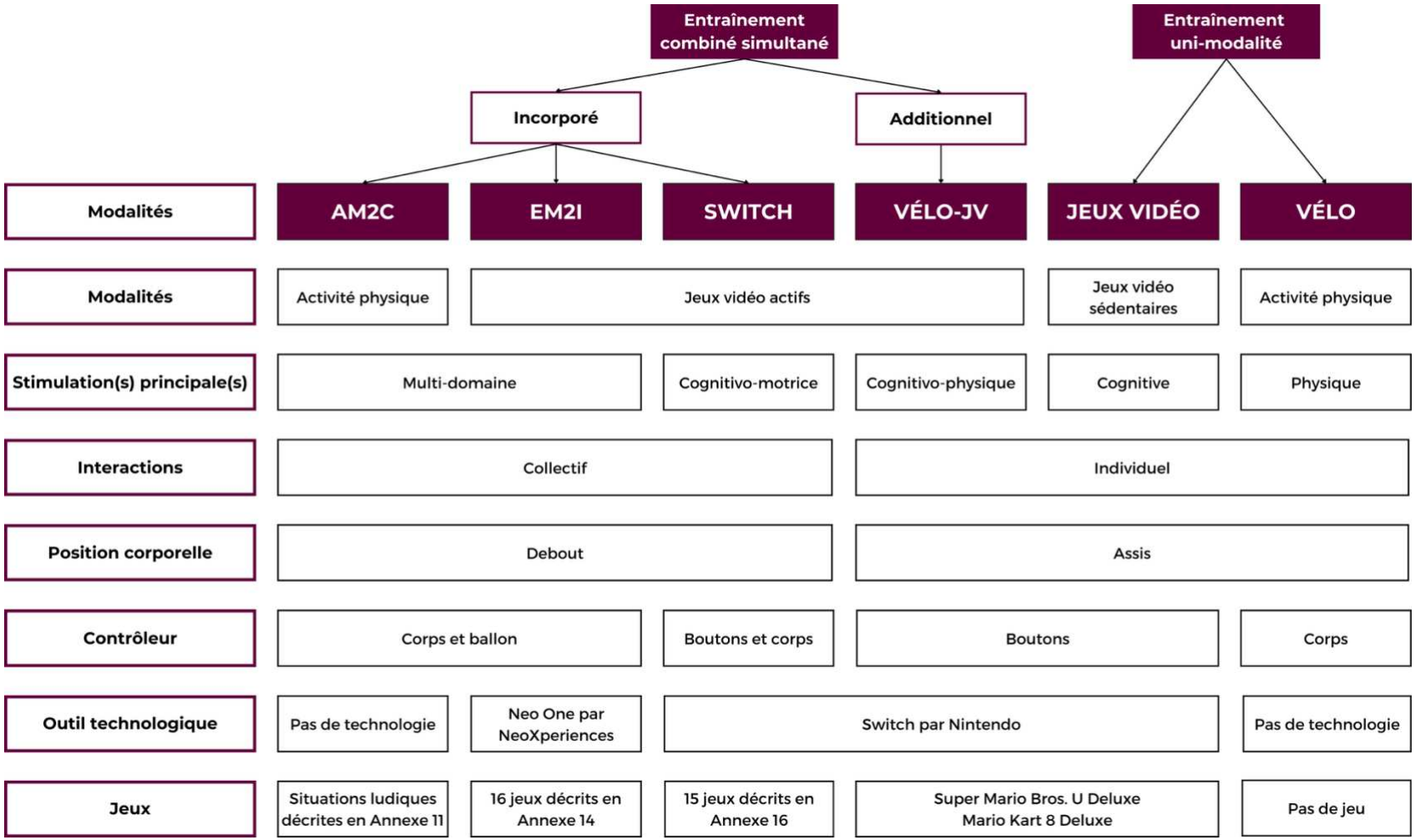


Figure 28. Décomposition des conditions expérimentales selon les caractéristiques des programmes (étude 4)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

2.3.1. Le programme d'Activités Motrices et Cognitives Complexes (AM2C)

Le programme a été réalisé sans outil technologique et reposait sur la sollicitation d'activités motrices et cognitives complexes. Du matériel varié a été utilisé (i.e., ballon de basket-ball, ballon de handball, ballon en mousse, ballon de rugby, ballon de baudruche, élastique, chaise, plot, cerceau, échelle de rythme, haie, step). Chaque séance débutait par un échauffement en lien avec les habiletés motrices sollicitées et les thématiques abordées pendant le corps de séance. Le corps de séance a été structuré en deux parties distinctes. La première partie, d'une durée d'environ 35 minutes, était basée sur des exercices collectifs de coopération et/ou d'opposition centrés sur le jeu (Annexe 11). Par exemple, dans le jeu « Passe à 10 », deux équipes s'affrontaient dans un espace délimité, l'objectif étant pour une équipe de réussir dix passes consécutives sans interception. Dans le jeu « Rugby avec chasubles », les participants devaient marquer en posant le ballon dans une zone définie, tout en respectant une règle de passe en arrière, et en évitant que leur chasuble (accrochée à leur ceinture) ne soit enlevée par l'équipe adverse. La seconde partie, d'une durée d'environ 10 minutes, était consacrée à des exercices de renforcement musculaire au poids du corps ou avec du petit matériel (i.e., élastique, medicine ball) sous forme de circuit training, en duo (Annexe 12). Les exercices du corps de séance ont été progressivement complexifiés grâce à l'ajout de variables.

2.3.2. Le programme d'Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif (EM2I)

Les séances du programme EM2I étaient réalisées à l'aide du mur immersif et interactif NeoOne. Cet outil est décrit en détail dans la partie 2.2 de l'étude 3. Les échauffements, progressivement complexifiés, ont permis aux participants de monter en intensité, en augmentant leur fréquence cardiaque, tout en intégrant les gestes techniques essentiels pour performer lors des jeux. Un échauffement articulaire était d'abord réalisé pendant quelques minutes, suivi d'un ou deux exercices sélectionnés selon trois thèmes : a) lancer et rattraper une balle, b) se baisser pour récupérer une balle, c) situation de DT avec une balle (voir Annexe 13 pour un détail des échauffements). Les exercices des thèmes b) et c) ont également été abordés lors de l'échauffement afin d'être réutilisés dans les corps de séance, facilitant ainsi une progression graduelle et une complexification progressive des jeux.

Le corps de séance comprenait 5 à 7 jeux de 5 minutes, sélectionnés parmi un panel de 16 jeux (décrits précisément en Annexe 14), représentant une stimulation effective de 25 à 35 minutes par séance. Du matériel varié a été utilisé (i.e., ballon de basket-ball, ballon de handball, ballon en mousse, ballon de rugby, ballon de baudruche, élastique, chaise, plot, cerceau, échelle de rythme, haie, step). Les jeux ont été progressivement complexifiés grâce à la sélection de niveaux (i.e., faible, normal, difficile) et

par l'ajout d'exercices supplémentaires pendant les jeux (voir Annexe 15). Ces ajustements visaient à introduire des situations de coopération et/ou d'opposition par équipe, dans les jeux qui ne le permettaient pas initialement et à augmenter la complexité sur les plans physique et/ou moteur. La difficulté a été amplifiée progressivement, aussi bien entre les séances (inter-séances) qu'au sein d'une même séance (intra-séance), afin d'assurer une adaptation progressive des participants.

2.3.3. Le programme SWITCH

Les séances du programme SWITCH ont été réalisées à l'aide du dispositif *Nintendo Switch* (décrit en détail dans la partie 2.2 de l'étude 3). Les exergames étaient joués debout, sollicitant à la fois les capacités motrices et cognitives, tout en favorisant les interactions collectives (i.e., coopération, opposition) grâce au mode multijoueur.

Le corps de séance comprenait 4 à 6 jeux d'une durée de 3 à 10 minutes, sélectionnés parmi un panel de 15 jeux (Annexe 16). Cela représentait une stimulation effective de 25 à 35 minutes par séance. Du matériel varié était utilisé (i.e., haie, plateforme de step, coussin d'équilibre). Les jeux étaient complexifiés grâce à la sélection de niveaux (i.e., faible, normal, difficile) et par l'ajout d'exercices supplémentaires pendant les jeux (Annexe 17). Les ajouts avaient pour objectif de favoriser la complexité motrice et/ou d'augmenter l'intensité. La difficulté était amplifiée progressivement, aussi bien entre les séances (inter-séances) qu'au sein d'une même séance (intra-séance), afin d'assurer une adaptation progressive des participants.

2.3.4. Le programme VÉLO

Le programme a été réalisé à l'aide du même type de vélo semi-allongé (*Ultra Green R 2.0 Moovyoo*), que décrit dans la partie 2.2 de l'étude 3. Comme pour les autres programmes, les séances ont été réalisées collectivement, dans une même salle où les participants pouvaient échanger oralement. L'échauffement consistait en une montée progressive de l'intensité, obtenue par une augmentation graduelle de la résistance du vélo, permettant une activation musculaire progressive et une préparation cardiovasculaire adaptée. Le corps de séance consistait en une période de pédalage continu d'environ 45 minutes, pendant laquelle les participants étaient encouragés à maintenir une cadence régulière selon leurs capacités, tout en ayant la liberté d'ajuster la résistance en fonction de leur ressenti. La distance totale réalisée pendant chaque séance était relevée.

2.3.5. Le programme Jeux Vidéo (JV)

Le programme a été conçu avec des consoles *Nintendo Switch*. Les participants jouaient individuellement, dans une salle commune, où ils pouvaient interagir oralement. Les manettes Joy-Con étaient fixées à la console que les participants tenaient en main, de sorte que le jeu se déroulait exclusivement à l'aide des boutons. Les participants alternaient chaque semaine entre deux jeux.

Le premier jeu, *New Super Mario Bros. U Deluxe*, est le même qu'utilisé dans l'étude 3 (décrit dans la partie 2.2). Tout comme pour l'étude 3, le jeu était pratiqué en mode aventure, en solo. Par ailleurs, pour faciliter l'expérience de jeu, des personnages avec des modes simplifiés pouvaient être utilisés. Carottin (le plus accessible) est invincible face aux ennemis et aux projectiles, mais peut toujours tomber dans les précipices. Toadette dispose d'un double saut (facilitant l'évitement des précipices), peut planer brièvement et remonte automatiquement après une chute. Les autres personnages, Mario, Luigi, Toad et Mii offrent une expérience sans assistance particulière. Le choix des personnages était modifié au cours du programme afin d'augmenter progressivement la difficulté.

Le second, *Mario Kart 8 Deluxe*, est un jeu de course automobile. Ce jeu propose des courses dynamiques et colorées dans l'univers de Mario, avec de nombreux personnages, véhicules et circuits variés. Dans le cadre du programme, chaque participant jouait en solo, en mode Grand Prix, où il choisissait une coupe parmi les 12 disponibles. Chaque coupe comprenait 4 courses qui se déroulaient sur des circuits aux environnements variés. La difficulté du mode Grand Prix progressait selon trois niveaux : 50 centimètres cubes (cc), 100cc et 150cc (du plus lent au plus rapide). Deux options d'assistance étaient disponibles : i) la conduite assistée qui empêchait le kart de sortir de la piste ou de tomber dans le vide, ii) l'accélération automatique qui permettait au véhicule d'atteindre automatiquement sa vitesse maximale sans que le joueur ait à maintenir le bouton d'accélération. Les niveaux et les conditions d'assistance étaient modulés au cours du programme afin d'augmenter progressivement la difficulté.

2.3.6. Le programme vélo et jeux vidéo (VÉLO-JV)

Ce programme consistait en une combinaison des programmes VÉLO et Jeux Vidéo. L'échauffement était réalisé sans console et était identique à celui du programme VÉLO. Pendant le corps de séance, si les participants arrêtaient de pédaler ou de jouer (pour privilégier l'une ou l'autre tâche), ils étaient encouragés par l'EAPA à ne pas le faire. La distance totale réalisée pendant chaque séance était relevée.

2.3.7. Le Groupe Contrôle (GC)

Ce groupe ne suivait aucun des programmes. Il a été demandé aux participants de continuer à conserver leurs habitudes de vie.

2.4. Mesures

En fonction des variables testées, les outils ont été utilisés sur quatre périodes différentes : i) uniquement en pré-tests, ii) pendant les programmes (iii) en pré-tests, en post-tests et en tests de rétention, iv) uniquement en post-tests (Figure 29).

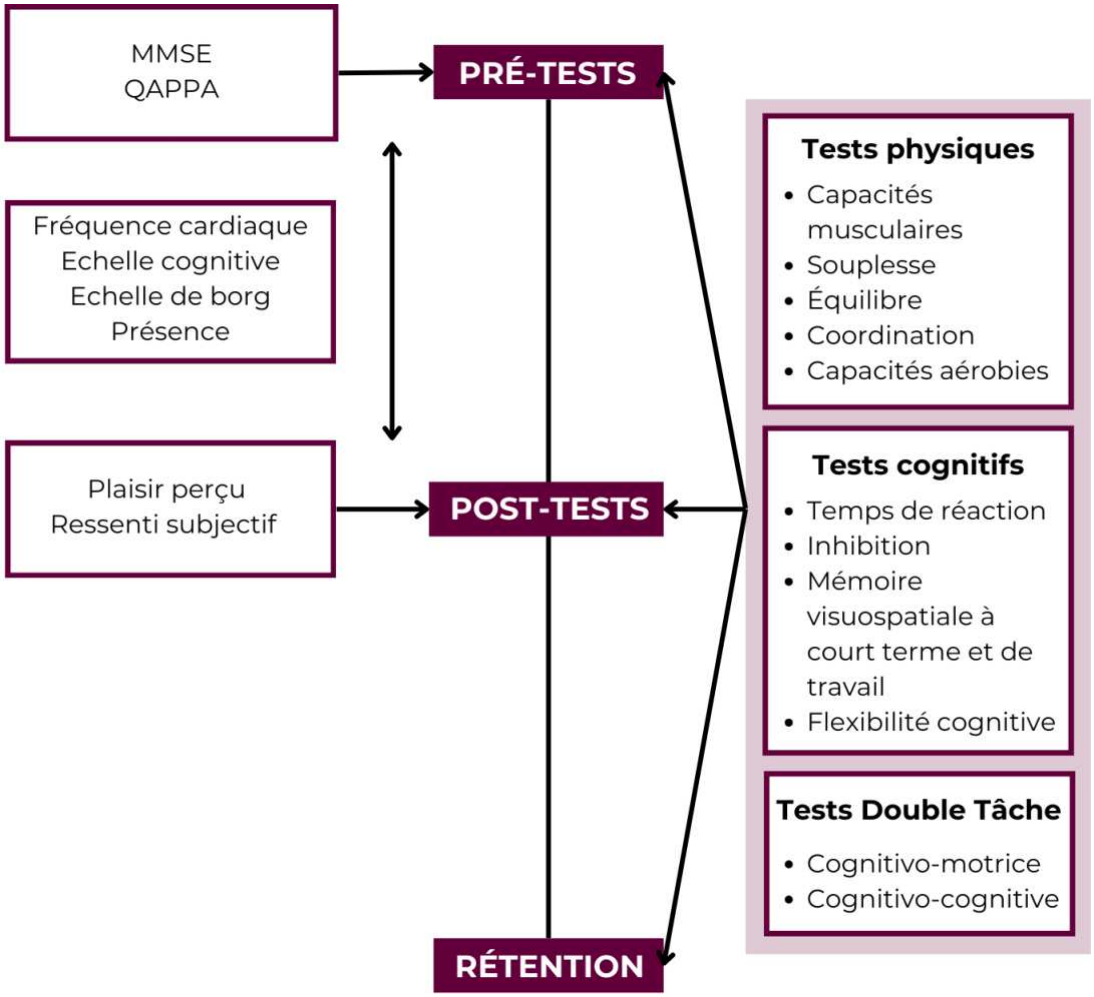


Figure 29. Variables testées en fonction du temps (étude 4)

Note. *MMSE : Mini-Mental State Examination ; QAPPA : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées.*

2.4.1. Uniquement en pré-test

Deux tests ont été réalisés uniquement en pré-test. Le *Mini-Mental State Examination* (MMSE) était utilisé en critère d'inclusion et le Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées (QAPPA) permettait d'évaluer le niveau d'activité physique des participants avant qu'ils n'intègrent l'étude.

Le **MMSE** (Folstein et al., 1975) est un test permettant d'évaluer le niveau cognitif global et de dépister les troubles cognitifs. Le MMSE est noté sur une échelle de 0 à 30 points, 30 représentant le score maximal. Un score compris entre 27 et 30 points indique une absence de troubles cognitifs. Ainsi, seuls les sujets ayant obtenu un score supérieur ou égal à 27 ont été inclus.

Le **QAPPA** est un questionnaire validé (de Souto Barreto et al., 2011), décrit dans la partie 2.3.2 de l'étude 3, spécifiquement conçu pour les personnes âgées, permettant d'évaluer le niveau d'activité physique. Le score est indiqué en MET/semaine.

2.4.2. En pré-tests, en post-tests et en tests de rétention

Une batterie de tests a été réalisée 1 semaine avant le début du programme (pré-tests), 1 semaine après la fin du programme (post-tests) et 12 semaines après la fin du programme (tests de rétention). La batterie de tests durait environ 1h30 par participant. Les tests ont été réalisés individuellement dans une pièce calme. Une pause d'environ 3 minutes était observée entre chaque test cognitif afin de gérer la fatigue mentale et l'attention des participants. De plus, il était régulièrement demandé aux participants s'ils avaient besoin d'une pause supplémentaire et s'ils se sentaient prêts à commencer un autre test. Tous les participants ont passé les tests dans le même ordre, en pré-tests, en post-tests et en tests de rétention.

2.4.2.1. Tests physiques

Trois des six tests du *Senior Fitness Test* (Rikli & Jones, 1999) ont été utilisés [i.e., Test de Marche de 6 minutes (TM6), 30 secondes assis debout, gratte-dos). Ce protocole d'évaluation de la condition physique permet d'apprécier et de mesurer les capacités fonctionnelles renvoyant aux gestes de la vie quotidienne. Plusieurs tests ont été ajoutés (i.e., *handgrip*, *sit-and-reach test*, test de coordination des membres inférieurs, STEP, TUG sur 3 mètres) pour compléter l'évaluation.

- **Capacités musculaires**

30 secondes assis-debout. Ce test évalue la force musculaire du bas du corps (Jones et al., 1999). Le participant doit réaliser le maximum de levers de chaise en 30 secondes avec les bras croisés sur la poitrine.

Handgrip. Ce test permet d'évaluer la force de préhension (Mathiowetz et al., 1985). Le sujet doit serrer la poignée d'un dynamomètre (Takeï TK200) le plus fort possible. La moyenne entre le côté droit et le côté gauche a été calculée.

Lancer de Medicine Ball. Ce test mesure la force musculaire du haut du corps. Il a été validé pour les personnes âgées (Harris et al., 2011). Le sujet est assis sur une chaise placée contre un mur. Le dos est appuyé contre le dossier et les pieds sont à plat sur le sol. Le participant doit lancer à deux mains le medicine ball (2 kg pour les femmes, 3 kg pour les hommes) le plus loin possible, en partant de la poitrine. La distance entre le sujet et l'endroit où atterrit le medicine ball a été relevée.

- **Souplesse**

Sit-and-reach test. Ce test permet d'évaluer la souplesse du bas du corps, notamment celle des ischio-jambiers (Mayorga-Vega et al., 2014). Le sujet est assis sur le sol, les jambes tendues vers l'avant, et les pieds à plat (pointes de pieds vers le plafond) contre l'extrémité avant d'une boîte de test. Dans un mouvement lent et régulier, le sujet doit se pencher vers l'avant, garder les jambes à terre et faire glisser ses mains le long de la règle aussi loin que possible. La distance entre les pieds et les mains est mesurée.

Gratte-dos. Ce test mesure la souplesse des membres supérieurs (Rikli & Jones, 1999). Debout, le sujet doit passer une main au-dessus de l'épaule, paume de la main contre le dos et l'autre en dessous, dos de la main contre le dos. Il essaie de rapprocher le plus possible ses deux mains. Le nombre de centimètres qui séparent les extrémités des majeurs est relevé. La moyenne entre le côté droit et le côté gauche a été calculée.

- **Équilibre**

Timed Up and Go (TUG). Il évalue l'équilibre dynamique (Podsiadlo & Richardson, 1991). Le participant doit se lever d'une chaise, faire le tour d'un plot (situé à 3 mètres) en marchant et venir se rasseoir sur la chaise. Le temps pour réaliser le parcours est relevé.

- **Coordination**

Test de coordination du bas du corps. Ce test permet d'évaluer la coordination du bas du corps. Le participant doit franchir une échelle de rythme le plus rapidement possible, en respectant une séquence de mouvements de pieds et en faisant le moins d'erreurs possible (i.e., toucher l'échelle, non-respect de la séquence de mouvements). Le temps pour réaliser la tâche ainsi que le nombre d'erreurs sont relevés.

- **Capacités aérobies**

Test de Marche de 6 minutes (TM6) (Rikli & Jones, 1998). Le participant doit parcourir la plus grande distance possible, en marchant 6 minutes, sur des allers-retours de 30 mètres délimités par deux plots. La distance parcourue est relevée.

Pour la majorité des tests (i.e., 30 secondes assis-debout, *handgrip*, lancer de medicine ball, *sit-and-reach test*, gratte-dos, TUG, test de coordination), deux essais ont été réalisés et le meilleur des deux était conservé. Le TM6 n'a été effectué qu'une seule fois.

2.4.2.2. Évaluation cognitive

Une batterie de tests a été effectuée afin d'évaluer le temps de réaction des sujets et leurs fonctions cognitives (i.e., inhibition, flexibilité cognitive, mémoire visuospatiale à court terme, mémoire visuospatiale de travail). Les tests de temps de réaction (TR 2, TR 8, TR $8_{inhibitif}$) ainsi que le score d'inhibition utilisés dans cette étude sont identiques à ceux employés dans l'étude 1 (détaillés dans la section 2.2.1 de l'étude 1) pour ces quatre scores, la performance correspond au temps moyen par essai, obtenu sur 20 essais.

- **Temps de réaction**

Temps de Réaction à 2 choix (TR 2). Il a été évalué dans les mêmes conditions que le Temps de Réaction à 8 choix (TR 8) de l'étude 1 (décrit ci-dessous), avec 2 sémaphores centraux au lieu de 8.

Temps de Réaction à 8 choix (TR 8). Le participant doit éteindre le plus rapidement possible le sémaphore qui s'allume aléatoirement en rouge. Le test développé dans l'étude 1 a été réutilisé dans les mêmes conditions (voir description dans la section 2.2.1 de l'étude 1).

- **Inhibition**

Temps de Réaction Inhibitif (TR $8_{inhibitif}$). Le participant doit éteindre le plus vite possible le sémaphore qui s'allume avec la lettre O de couleur verte. Les autres sémaphores s'allument également en vert, associés avec une autre lettre (i.e., A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L), voir description détaillée dans la section 2.2.1 de l'étude 1).

Score d'inhibition. Le score est calculé en soustrayant le temps obtenu au TR $8_{inhibitif}$ à celui du temps obtenu au TR 8 (TR $8_{inhibitif}$ - TR 8).

Tâche Go/No-Go. Ce test est issu du TAP [*Test of Attentional Performance* (Zimmermann & Fimm, 1994)], une batterie de tests informatisée. Un symbole apparaît à l'écran, une croix correspondant soit au signe de l'addition (+), soit à celui de la multiplication (x). Le participant doit appuyer sur une touche le plus rapidement possible lorsqu'il voit le symbole x et ne pas appuyer lorsqu'il voit le symbole +. La moyenne et l'écart-type du temps de réaction, ainsi que les erreurs sont enregistrés.

- **Mémoire visuospatiale à court terme et mémoire visuospatiale de travail**

Test de Corsi. La première partie de ce test (Wechsler, 1997) évalue la mémoire visuospatiale à court terme. Le participant doit reproduire dans le même ordre une séquence de mouvements de pointage de différents cubes désignés par l'examinateur, déterminant l'empan visuospatial. Dans la deuxième partie, qui évalue la mémoire de travail visuospatiale, les participants reproduisent une séquence de mouvements dans l'ordre inverse (à rebours), déterminant l'empan visuospatial inverse (voir description détaillée dans la section 2.2.2.1 de l'étude 1).

- **Flexibilité cognitive**

Trail Making Test. Le TMT évalue principalement la flexibilité cognitive (Reitan, 1979). La Partie A consiste à relier une série de nombres croissants allant de 1 à 25, en sélectionnant le nombre pertinent parmi les 25 items possibles. Dans la Partie B, le participant alterne entre deux séries, une composée de nombres et l'autre de lettres (e.g., 1-A-2-B-3-C). La flexibilité est spécifiquement mise en évidence par l'analyse de la différence de *Temps B – Temps A*, qui représente une mesure plus pure de flexibilité cognitive (voir description détaillée dans la section 2.2.2.3 de l'étude 1).

2.4.2.3. Double-tâches

Deux types de DT ont été évalués : une DT cognitivo-motrice et une DT cognitivo-cognitive. Dans les deux cas, chaque tâche a été réalisée d'abord en condition de ST, puis en situation de DT. Les tâches de la DT cognitivo-motrice duraient 1 minute et celles de la DT cognitivo-cognitive 2 minutes. Tout comme pour l'étude 2, l'effet de double-tâche (*Dual-Task Effect*, DTE) a été calculé pour évaluer l'interaction entre les deux tâches (calcul détaillé dans la partie 2.2 de l'étude 2).

- **Double-tâche cognitivo-motrice**

La DT cognitivo-motrice est inspirée de la DT autogénérée de l'étude 2 (voir partie 2.2). Elle se compose d'une tâche motrice (STEP) et d'une tâche cognitive (décompte). Une modification a été apportée : la tâche motrice doit désormais être effectuée le plus rapidement possible, contrairement à l'étude 2 où elle était réalisée à un rythme naturel. Lors de l'étude 2, la tâche motrice était réalisée avec facilité et ne générait pas d'interférence avec la tâche cognitive. Cela permet donc d'augmenter la complexité de DT.

Deux DTE ont été obtenus :

- **DTE tâche cognitive :** l'effet de la DT cognitivo-motrice pour la tâche cognitive (décompte)
- **DTE tâche motrice :** l'effet de la DT cognitivo-motrice pour la tâche motrice (STEP)

- **Double-tâche cognitivo-cognitive**

Pour cette condition, un nouveau test a été élaboré à partir de deux tâches cognitives. La première est la tâche de Go/No-Go (décrit dans la partie 2.4.2.2 de cette étude), et la seconde est une tâche de comptage sonore, déjà utilisée dans l'étude 2 pour la DT générée par l'environnement (décrite dans la partie 2.2 de l'étude 2).

Deux DTE ont été mesurés :

- **DTE tâche cognitive 1 :** l'effet de la DT cognitivo-cognitive pour la première tâche cognitive (Go/No-Go)
- **DTE tâche cognitive 2 :** l'effet de la DT cognitivo-cognitive pour la deuxième tâche (comptage sonore)

Les tâches cognitives ont été numérotées afin de les différencier, mais il est important de noter qu'aucune priorisation n'a été demandée.

2.4.3. Pendant les programmes

Fréquence Cardiaque (FC). Elle a été relevée pendant l'ensemble des séances à l'aide du cardiofréquencemètre Polar Verity Sense, placé sur le biceps. Pour quantifier l'intensité de l'exercice physique, le calcul de la proportion de la Fréquence Cardiaque de Réserve (FCR) a été utilisé selon la méthode de Karvonen. La FCR représente la différence entre la FCMT (Équation 4) et la Fréquence Cardiaque de repos (FC repos). L'intensité maximale a été calculée en suivant le même calcul. Les intensités moyennes et maximales pour l'ensemble du programme ont été calculées pour chaque participant.

Échelle de Borg modifiée (Borg, 1982). Cette échelle (de 0 à 10) mesure la perception de l'effort physique pendant les programmes (décrite dans la partie 2.3.2 de l'étude 3). Les participants devaient évaluer subjectivement leur effort perçu après chaque séance à l'aide de l'échelle de Borg modifiée. Un score moyen pour l'ensemble du programme a été calculé pour chaque participant.

Échelle de l'effort cognitif. Tout comme l'échelle de Borg modifiée, l'échelle de l'effort cognitif est cotée de 0 (aucun effort) à 10 (effort maximal). Les participants devaient évaluer subjectivement leur effort cognitif perçu après chaque séance. Un score moyen pour l'ensemble du programme a été calculé pour chaque participant.

Compliance. La présence a été relevée afin d'évaluer le taux de compliance aux programmes. Elle est exprimée en pourcentage, selon le calcul suivant :

$$\text{Taux de compliance} = \frac{\text{Nombre de séances réalisées}}{\text{Nombre de séances total}} \times 100$$

Équation 6. Taux de compliance

2.4.4. Uniquement en post-test

Le questionnaire de Plaisir perçu. Ce questionnaire, décrit dans la partie 2.3.2 de l'étude 3, permet d'évaluer le plaisir perçu lors de la pratique des activités physiques et sportives (Delignières & Perez, 1998). Il comporte 10 items sous la forme d'une échelle de 1 (absolument pas d'accord) à 7 (tout à fait d'accord), soit un score total situé entre 7 et 70.

Le questionnaire de ressenti subjectif. À la fin du programme, les sujets remplissaient un questionnaire qui avait pour but d'évaluer leur ressenti. Il est composé de quatre questions sous forme d'échelle à

quatre niveaux, à propos i) de la difficulté des séances (très facile à très élevée), ii) la perception de leur évolution physique (très négative à très positive) et iii) cognitive (très négative à très positive) et iv) l'envie de continuer un programme de ce type (très faible à très forte).

2.5. Analyse des données

Les analyses ont été réalisées à partir des données des participants ayant réalisé les pré-tests et les post-tests.

2.5.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes

L'équivalence initiale des groupes a été vérifiée à partir des variables personnelles. Les variables continues ont été analysées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur (groupe), complétée par des post hoc si une différence était retrouvée, tandis que les variables catégorielles ont été examinées au moyen de tests du Chi^2.

2.5.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests

Cette étape visait à détecter d'éventuelles différences significatives entre les groupes sur les performances initiales aux tests physiques, moteurs, cognitifs, et de DT. Une ANOVA à un facteur (groupe) a été utilisée.

2.5.3. Analyse des données collectées pendant les séances d'intervention et à la fin des programmes

Les variables mesurées au cours de l'intervention et à la fin des programmes (compliance, intensités physiques objective et subjective, intensité cognitive subjective, plaisir perçu, évolutions ressenties) ont été comparées en fonction du groupe à l'aide d'une ANOVA à un facteur inter-sujet (groupe) pour les variables continues et de tests du Chi^2 pour les variables catégorielles. Des contrastes planifiés (le protocole de codage est décrit en Annexe 18) ont été réalisés sur le facteur *groupe* pour évaluer les effets spécifiques de quatre comparaisons *a priori* :

1) Entraînement simultané (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) vs entraînement physique seul (i.e., VÉLO),
2) Entraînement simultané vs entraînement cognitif seul (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, JV),
3) Entraînement incorporé (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH) vs additionnel (i.e., VÉLO-JV),
4) Entraînement simultané naturel (i.e., AM2C) vs entraînement simultané virtuel (i.e, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV).

Ces analyses ont été complétées, lorsque cela était pertinent, par des analyses post hoc afin d'identifier les groupes à l'origine des différences observées. Des corrélations de Pearson ont également été réalisées afin de tester les liens existants entre les paramètres d'intensité physique, de perception de l'effort et de plaisir.

2.5.4. Analyse de l'évolution immédiate entre les pré-tests et les post-tests

Cette étape visait à évaluer les effets des programmes d'intervention en comparant l'évolution des performances entre les pré-tests et les post-tests. Une analyse de variance à mesures répétées [facteur intra-sujet : temps (pré-tests vs post-tests), facteur inter-sujet : groupe (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV, VÉLO, JV, groupe contrôle)] a été réalisée. En cas de différence significative en pré-tests (voir la partie 2.5.2), la valeur en pré-tests a été incluse comme covariable.

Des contrastes planifiés (le protocole de codage est décrit en Annexe 18) ont été conduits sur l'interaction *temps* × *groupe* pour tester les différences d'effets entre :

1) Entraînement simultané vs contrôle,
2) Entraînement incorporé vs contrôle,
3) Entraînement simultané vs entraînement cognitif seul,
4) Entraînement simultané vs entraînement physique seul,
5) Entraînement incorporé vs entraînement additionnel,
6) Entraînement simultané virtuel vs entraînement simultané naturel.

Ces analyses ont été complétées, lorsque cela était pertinent, par des analyses post hoc afin d'identifier les groupes à l'origine des différences observées.

2.5.5. Régression multiple pour prédire l'évolution cognitive

Des modèles de régression multiple ont été réalisés afin de prédire l'évolution des scores cognitifs à partir de l'évolution de la condition physique. Pour représenter la condition physique, cinq variables ont été sélectionnées : force du bas du corps, souplesse du bas du corps, équilibre, coordination et capacités aérobies. De plus, d'autres modèles de régression ont été effectués pour expliquer l'évolution cognitive à partir des modalités des programmes (intensité physique objective, intensité cognitive, plaisir perçu). La colinéarité entre les variables indépendantes a été vérifiée à l'aide du VIF (*Variance Inflation Factor*).

2.5.6. Informations complémentaires

Pour évaluer l'impact des interventions, deux approches sont généralement utilisées : l'analyse en intention de traiter (*Intention-To-Treat analysis,* ITT), qui inclut tous les participants randomisés quel que soit leur niveau de participation, et l'analyse *per protocole* (*Per-Protocol analysis*, PP), qui se limite aux participants ayant suivi le protocole et complété les pré-tests et les post-tests, avec généralement un seuil minimal de participation (e.g., ≥80 % des séances). L'ITT reflète l'efficacité en conditions réelles, tandis que la PP évalue l'efficacité potentielle dans des conditions optimales. Dans cette étude, une approche mixte a été adoptée : l'analyse a porté sur tous les participants ayant complété les évaluations pré-tests et post-tests, indépendamment de leur niveau de compliance. Cette approche intermédiaire entre ITT et PP permet de disposer de données complètes pour l'analyse, tout en tenant compte des variations de compliance, assurant ainsi la validité des comparaisons intergroupes.

Pour les ANOVA à un facteur, en cas de violation de l'hypothèse d'homogénéité des variances (test de Levene), la correction de Brown-Forsythe a été appliquée. Pour les ANOVA à mesures répétées, une transformation logarithmique des données (log népérien) a été effectuée lorsque l'hypothèse d'homogénéité des variances était violée. Dans le cas contraire, les données brutes ont été conservées. Ces traitements sont décrits en détail en Annexe 19.

Lorsque des effets significatifs ont été observés, des analyses post hoc ont été réalisées afin d'identifier les groupes à l'origine des différences. Une correction de Holm a été appliquée pour les ANOVA à mesures répétées afin de contrôler le risque d'erreurs de type I liées aux comparaisons multiples. Pour les ANOVA simples, la correction de Tukey a été utilisée si les variances étaient homogènes. Lorsque ce n'était pas le cas, la correction Games-Howell a été utilisée. Pour les tests du Chi^2, les résultats sont considérés comme significatifs à $p < 0,05$ lorsque la valeur absolue du résidu standardisé est supérieure à 1,96, à $p < 0,01$ lorsqu'elle est supérieure à 2,58, et à $p < 0,001$ lorsqu'elle dépasse 3. L'interprétation des tailles d'effet en fonction du test est décrite dans le Tableau 7 de l'étude 3.

2.5.7. Justification

Dans le cadre de cette étude, les effets de différentes conditions d'intervention (7 groupes expérimentaux) ont été évalués à travers deux temps de mesure. Ce plan expérimental implique à la fois un facteur intra-sujets (le temps) et un facteur inter-sujets (le groupe). Pour analyser ces données, une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA mixte) a été utilisée. Elle est particulièrement adaptée dans ce contexte pour plusieurs raisons. Les performances de chaque participant sont mesurées à deux

reprises, ce qui crée une dépendance statistique entre les observations. L'ANOVA à mesures répétées prend en compte cette structure corrélée des données et permet de contrôler la variabilité inter-individuelle, améliorant ainsi la puissance des analyses. De plus, l'ANOVA permet d'évaluer l'effet principal du *temps* (évolution globale), l'effet principal du *groupe* (différences inter-sujets), et surtout, l'interaction *temps* × *groupe,* essentielle pour déterminer si les groupes évoluent différemment au fil du temps. L'ANOVA à mesures répétées apparaît comme le choix méthodologique le plus approprié pour analyser l'effet des interventions dans un cadre longitudinal, avec plusieurs groupes et mesures dépendantes dans le temps.

En complément de l'ANOVA, des analyses par contrastes planifiés ont été menées afin de tester des hypothèses spécifiques définies *a priori*, portant sur les effets différentiels des modalités d'intervention. Dans un design à sept groupes, une ANOVA permet d'identifier une différence d'évolution entre les groupes, mais ne permet pas de déterminer quelles comparaisons précises sont à l'origine de cet effet, ni de les mettre en relation directe avec les hypothèses théoriques de l'étude. Les contrastes planifiés permettent ainsi de cibler des comparaisons conceptuellement justifiées, telles que celles opposant les entraînements simultanés au groupe contrôle, ou encore la comparaison entre les entraînements incorporé et additionnel. En se limitant aux comparaisons prévues par le protocole expérimental, cette approche évite les explorations post hoc excessives et réduit le risque d'erreurs de type I[1] lié à la multiplication des tests. Par ailleurs, les contrastes planifiés présentent une meilleure puissance statistique, car ils ne requièrent pas de corrections aussi strictes que les analyses post hoc. Ils constituent ainsi un outil rigoureux pour opérationnaliser les hypothèses théoriques de l'étude, en testant des comparaisons ciblées entre sous-groupes définies selon la nature des stimulations proposées.

3. RÉSULTATS

3.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes

Les variables personnelles des participants (i.e., âge, sexe, MMSE, QAPPA, santé subjective, année d'éducation, IMC) sont indiquées dans le Tableau 12. Il n'y a aucune différence significative entre les groupes.

[1] L'erreur de type I correspond à conclure qu'il existe un effet alors qu'en réalité il n'y en a pas.

Tableau 12. Caractéristiques personnelles des participants (étude 4)

	AM2C ***n* = 17**	**EM2I** ***n* = 23**	**SWITCH** ***n* = 22**	**VÉLO-JV** ***n* = 22**	**VÉLO** ***n* = 19**	**JV** ***n* = 15**	**GC** ***n* = 21**	***p***
	Moyenne (ET)	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	
Âge (années)	67,76 (3,25)	68,96 (5,82)	69,27 (5,88)	69,14 (6,17)	69,74 (5,95)	70,33 (5,94)	70,38 (6,09)	0,848
Femme (%)	82,35	73,91	95,45	81,82	73,68	73,33	71,43	0,477
MMSE (score)	28,94 (0,97)	29,43 (0,73)	28,86 (0,94)	29,05 (0,95)	28,89 (0,88)	29,13 (0,92)	28,86 (0,96)	0,338
QAPPA[1] (MET/semaine)	215,29 (181,32)	237,83 (202,30)	203,64 (277,93)	230 (287,24)	312,63 (411,03)	350,67 (277,32)	187,14 (329,17)	0,603[+]
Santé subjective (score)	3,82 (0,73)	3,65 (0,71)	3,77 (0,61)	3,91 (0,61)	3,84 (0,69)	3,93 (0,70)	3,90 (0,77)	0,860
Années d'éducation[2]	13,29 (3,22)	14,48 (3,22)	13,64 (1,94)	14,82 (3,23)	15,42 (2,59)	15,27 (2,71)	15,60 (1,93)	0,071
IMC (kg/m^2)	26,61 (4,26)	27,93 (4,40)	25,11 (4,87)	24,71 (4,95)	25,34 (8,61)	24,70 (4,89)	24,19 (2,96)	0,238

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; ET : Écart-Type ; GC : Groupe Contrôle ; IMC : Indice de Masse Corporelle ; JV : Jeux Vidéo ; kg : kilogramme ; m : mètre ; MET : Metabolic Equivalent of Task ; MMSE : Mini-Mental State Examination ; QAPPA : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.* [+] *: la correction de Brown-Forsythe est appliquée pour corriger l'inégalité des variances.*

[1] Le niveau d'activité est considéré comme modéré si le participant a fait soit : i) au moins 150 minutes d'activité physique modérée, vigoureuse, ou les deux mélangées (ce qui correspond à 600 MET) dans 3 jours différents ou plus sur la semaine, ou ii) au moins 800 MET d'activité physique vigoureuse, modérée, ou les deux mélangées, dans 2 jours différents sur la semaine.

[2] La 1ère année d'éducation est en primaire. Douze années d'éducation correspondent au baccalauréat.

3.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests

Cette étape consiste à vérifier si les groupes présentaient des différences avant le début des programmes sur les scores physiques, moteurs, cognitifs et de DT obtenus en pré-tests (voir Annexe 20). Concernant les scores physiques, il y a une différence significative modérée pour le score 30 secondes assis-debout ($F(6,131) = 2,88$, $p = 0,011$, $\eta^2 = 0,12$). L'analyse post hoc révèle une différence significative entre les groupes AM2C et VÉLO-JV ($t(131) = 3,13$, $p = 0,035$, $d = 1,01$). Les résultats sont détaillés en Annexe 21. Il y a également une différence au DTE de la tâche cognitive 2 (DT cognitivo-cognitive) en pré-tests[1] ($F(6, 91,72) = 3,99$, $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,16$). L'analyse post hoc révèle une différence significative entre les groupes SWITCH et VÉLO ($t(38,37) = 3,17$, $p = 0,032$, $d = 0,99$). Les résultats des autres comparaisons sont détaillés en Annexe 22. Pour l'ensemble des mesures cognitives, il n'y a pas de différence entre les groupes.

En résumé, seuls le score au test 30 secondes assis-debout et au DTE de la tâche cognitive 2 (DT cognitivo-cognitive) présentent une différence significative entre les groupes lors des pré-tests. Ces deux variables ont donc été intégrées comme covariables dans les analyses portant sur les scores d'évolution immédiate correspondants, afin de contrôler l'effet des différences initiales entre les groupes.

3.3. Analyse des données collectées pendant les séances et à la fin des programmes

Cette étape vise à évaluer et comparer les différentes mesures récoltées à propos des programmes (i.e., présence, intensités, plaisir, envie de continuer, évolution subjective). Les données descriptives sont indiquées dans le Tableau 13.

3.3.1. Complétion

La complétion correspond au nombre d'individu étant allé au terme du programme. Le nombre de participants ayant interrompu leur participation, ainsi que les motifs de ces abandons, sont présentés dans la Figure 26. Trente-deux participants (21,33 %) ayant intégré un groupe actif ont abandonné lors du programme : 2 pour EM2I (8 %), 5 pour AM2C (22,73 %), 4 pour SWITCH (15,38 %), 4 pour VÉLO-JV (15,38 %), 9 pour JV (37,5 %), 8 pour VÉLO (29,63 %). Il y a eu 2 abandons dans le GC (9,09 %) entre les pré-tests et les post-tests.

[1] Le test de Levene est significatif ($p = 0,012$), indiquant une hétérogénéité des variances. Il a donc été utilisé l'ANOVA de Brown–Forsythe. Les comparaisons post hoc ont été réalisées avec la procédure de Games–Howell.

Tableau 13. Comparaisons des mesures d'intensités physiques, cognitives, de compliance et de plaisir entre les programmes (étude 4)

	AM2C	**EM2I**	**SWITCH**	**VÉLO-JV**	**JV**	**VÉLO**		
	Moyenne (ET)	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*p*	η^2
Compliance (%)	93,87 (8,65)	92,93 (7,89)	91,10 (6,34)	89,58 (16,15)	90,28 (11,43)	89,47 (8,38)	0,70	0,03
Intensité physique moyenne (% FCR)	46,73 (10,79)	50,46 (11,35)	40,44 (11,67)	43,15 (12,88)	12,19 (11,40)	48,34 (12,33)	**< 0,001**	**0,51**
Intensité physique maximale (% FCR)	74,15 (14,53)	73,09 (14,72)	69,04 (13,79)	56,23 (14,04)	21,58 (11,60)	65,75 (14,62)	**< 0,001**	**0,59**
Intensité cognitive subjective (score)	3,78 (0,97)	3,70 (0,93)	4,93 (0,52)	4,55 (0,55)	4,89 (0,88)	3,75 (1,61)	**< 0,001**	**0,24**
Intensité physique subjective (score)	4,24 (0,98)	4,73 (1,06)	4,67 (0,75)	4,18 (0,65)	2,92 (0,76)	4,57 (0,90)	**< 0,001**	**0,31**
Plaisir (score)	65,06 (4,23)	63,52 (6,93)	64,82 (5,56)	61,64 (5,91)	54,27 (7,56)	58,47 (6,64)	**< 0,001**	**0,26**

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; ET : Écart-Type ; FCR : Fréquence Cardiaque de Réserve ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

3.3.2. *Compliance*

Le taux de compliance aux programmes est en moyenne de 91,21 %. Il n'y a pas de différence significative concernant la présence lors des programmes ($F(5, 112) = 0{,}59$, $p = 0{,}70$). Il n'y a pas non plus de différence significative sur les contrastes planifiés ($p > 0{,}05$).

3.3.3. *Intensités physiques objectives et subjectives*

Les données pour chaque groupe concernant les intensités physiques objectives sont indiquées dans la Figure 30, et celles concernant les intensités physiques et cognitives subjectives sont indiquées dans la Figure 31.

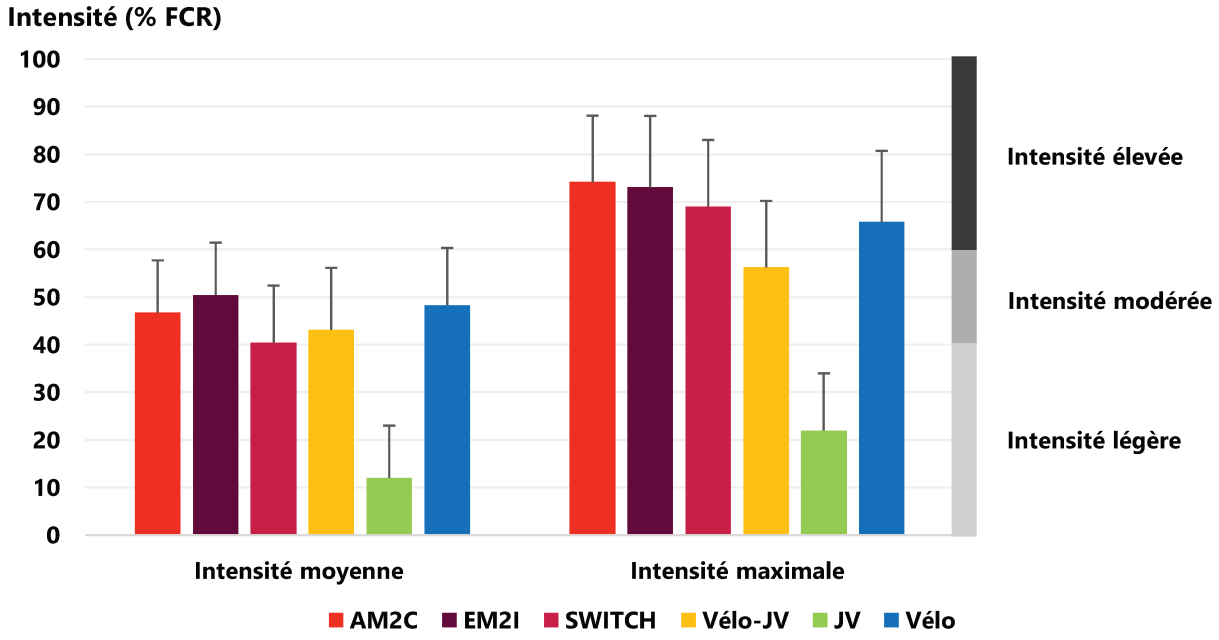


Figure 30. Intensités physiques moyennes et maximales en fonction du groupe (étude 4)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; FCR : Fréquence Cardiaque de Réserve ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

Intensité physique moyenne objective. Elle est considérée comme modérée, car elle est comprise entre 40 % et 60 % de la FCR pour les cinq groupes intégrant de l'activité physique. Une différence significative d'intensité moyenne est observée entre les groupes ($F(5, 112) = 23{,}23$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}51$).

Cette différence est principalement due au groupe JV qui présente une intensité moyenne plus faible que :

- AM2C ($t(112) = 8,26$, $p < 0,001$, $d = 2,93$),
- EM2I ($t(112) = 9,77$, $p < 0,001$, $d = 3,24$),
- SWITCH ($t(112) = 7,15$, $p < 0,001$, $d = 2,39$),
- VÉLO-JV ($t(112) = 7,84$, $p < 0,001$, $d = 2,63$),
- VÉLO ($t(112) = 8,87$, $p < 0,001$, $d = 3,06$).

Contrastes. L'analyse par contrastes planifiés indique que l'intensité est plus élevée pour l'entraînement simultané que pour l'entraînement cognitif (JV) ($t(112) = 9,97$, $p < 0,001$, $d = 2,80$).

Intensité physique maximale objective. Elle est considérée comme élevée pour AM2C, EM2I, SWITCH et VÉLO car elle est supérieure à 60 % de la FCR. Elle est modérée pour VÉLO-JV et faible pour JV. Il y a une différence significative d'intensité maximale entre les groupes ($F(5, 112) = 32,48$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,59$). Une nouvelle fois, cette différence est principalement due au groupe JV qui présente une intensité maximale plus faible que :

- AM2C ($t(112) = 10,58$, $p < 0,001$, $d = 3,75$),
- EM2I ($t(112) = 11,07$, $p < 0,001$, $d = 3,67$),
- SWITCH ($t(112) = 10,11$, $p < 0,001$, $d = 3,39$),
- VÉLO-JV ($t(112) = 7,38$, $p < 0,001$, $d = 2,47$),
- VÉLO ($t(112) = 9,12$, $p < 0,001$, $d = 3,15$).

De plus, VÉLO-JV a une intensité plus faible que :

- EM2I ($t(112) = 4,03$, $p = 0,001$, $d = 1,20$),
- AM2C ($t(112) = 3,96$, $p = 0,002$, $d = 1,28$),
- SWITCH ($t(112) = 3,03$, $p = 0,035$, $d = 0,91$).

Contrastes. L'analyse par contrastes planifiés indique que l'intensité est plus élevée pour l'entraînement simultané que pour l'entraînement cognitif ($t(112) = 11,83$, $p < 0,001$, $d = 3,32$), pour l'incorporé que l'additionnel ($t(112) = 4,53$, $p < 0,001$, $d = 1,13$) et pour l'entraînement simultané naturel que virtuel ($t(112) = 2,13$, $p = 0,035$, $d = 0,58$).

Intensité physique subjective. Elle est ressentie différemment entre les groupes ($F(5, 112) = 10,15$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,31$). Les post hoc confirment ces résultats en indiquant que l'intensité est perçue plus faiblement pour JV comparativement à :

- AM2C ($t(112) = 4{,}32$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}53$),
- EM2I ($t(112) = 6{,}34$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}10$),
- SWITCH ($t(112) = 6{,}07$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}03$),
- VÉLO-JV ($t(112) = 4{,}36$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}46$),
- VÉLO ($t(112) = 5{,}55$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}92$).

Contrastes. L'analyse par contrastes planifiés indique que l'entraînement simultané est perçu plus intense que l'entraînement cognitif seul ($t(112) = 6{,}35$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}78$).

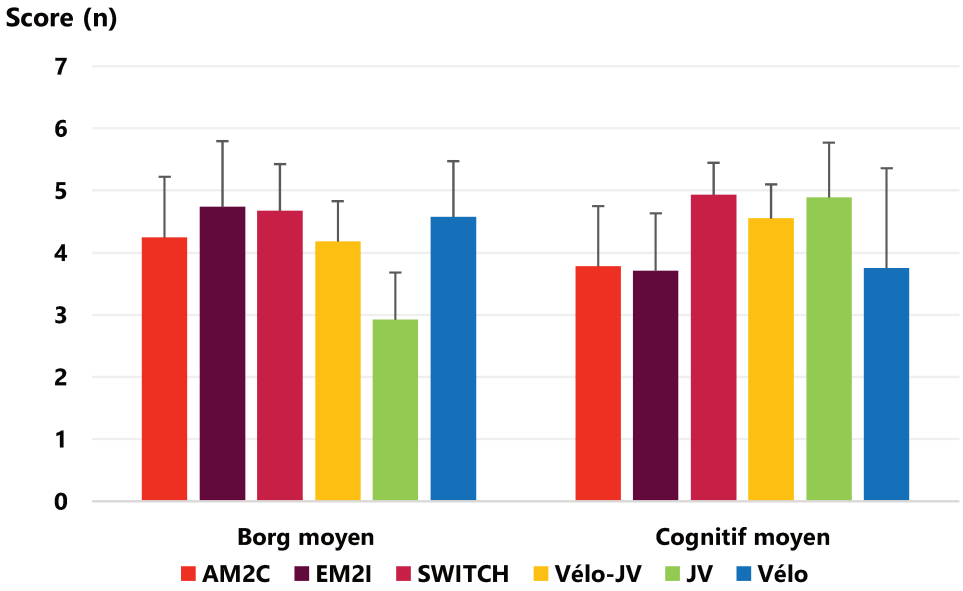


Figure 31. Intensités physiques et cognitives subjectives en fonction du groupe (étude 4)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; FCR : Fréquence Cardiaque de Réserve ; JV : Jeux Vidéo* ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; *VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

Intensité cognitive subjective. Il y a une différence significative entre les groupes ($F(5, 63{,}95) = 6{,}98$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}24$). Le groupe JV ressent une intensité plus élevée que les groupes EM2I ($t(31{,}20) = 3{,}98$, $p = 0{,}005$, $d = 1{,}24$) et AM2C ($t(29{,}97) = 3{,}40$, $p = 0{,}022$, $d = 1{,}16$). De plus, le groupe SWITCH ressent une intensité plus élevée que le groupe EM2I ($t(34{,}71) = 5{,}49$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}27$) et AM2C ($t(22{,}89) = 4{,}41$, $p = 0{,}002$, $d = 1{,}19$). VÉLO-JV a également une intensité plus élevée que EM2I ($t(34{,}71) = 3{,}74$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}88$).

Contrastes. L'analyse par contrastes planifiés indique que l'intensité perçue est plus élevée pour l'entraînement simultané que l'entraînement physique ($t(112) = 2{,}01$, $p = 0{,}047$, $d = 0{,}51$) et pour

l'entraînement simultané virtuel que naturel ($t(112) = 2{,}34$, $p = 0{,}021$, $d = 0{,}63$). En revanche, elle est plus élevée pour l'entraînement cognitif que pour l'entraînement simultané ($t(112) = 2{,}42$, $p = 0{,}017$, $d = 0{,}68$).

3.3.4. Distance parcourue par les participants des groupes VÉLO et VÉLO-JV

Les participants du groupe VÉLO ont parcouru en moyenne 14,47 km (ET = 2,14) par séance, contre 12,30 km (ET = 2,02) pour le groupe VÉLO-JV. Il y a une différence significative entre les deux groupes ($t(39) = 3{,}33$, $p = 0{,}002$).

3.3.5. Évaluation subjective des programmes par les participants

Plaisir perçu. Il y a une différence significative entre les groupes ($F(5, 112) = 7{,}82$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}26$). Effectivement, le plaisir est plus faible pour le groupe JV par rapport à AM2C ($t(112) = 4{,}90$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}74$), EM2I ($t(112) = 4{,}49$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}49$) et SWITCH ($t(112) = 5{,}07$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}70$). De plus, le groupe VÉLO obtient un moins bon score que SWITCH ($t(112) = 3{,}26$, $p = 0{,}017$, $d = 1{,}02$) et AM2C ($t(112) = 3{,}17$, $p = 0{,}023$, $d = 1{,}06$).

Contrastes. L'analyse par contrastes planifiés indique que l'entraînement simultané procure plus de plaisir que l'entraînement physique ($t(112) = 3{,}34$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}85$) et que l'entraînement cognitif ($t(112) = 5{,}44$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}53$).

Difficulté des séances. Il n'y a pas de différence significative concernant la perception de la difficulté des séances entre les groupes ($\chi^2(15, N = 118) = 19{,}85$, $p = 0{,}178$). Les séances sont jugées comme faciles (27,12 %) ou modérées (63,46 %) majoritairement.

Évolution physique. Une différence significative est observée dans le ressenti d'évolution physique entre les groupes ($\chi^2(15, N = 118) = 53{,}79$, $p < 0{,}001$, coefficient de contingence = 0,56). Le groupe JV présente une sur-représentation des participants en évolution « neutre » (60 %, résidu = 4,95) et « négative » (13,33 %, résidu = 3,74) ainsi qu'une sous-représentation des participants ayant perçu une évolution « positive » (26,67 %, résidu = -3,55). Le groupe AM2C présente une sur-représentation des participants déclarant une évolution « très positive » (35,29 %, résidu = 2,48), tandis que le groupe VÉLO présente une sur-représentation pour l'évolution « positive » (89,47 %, résidu = 2,28).

Évolution cognitive. Il y a une différence significative dans le ressenti d'évolution cognitive entre les groupes ($\chi^2(10, N = 118) = 19{,}05$, $p = 0{,}039$, coefficient de contingence = 0,37). Pour le groupe AM2C,

il y a une sur-représentation des participants ressentant une évolution « positive » (23,53 %, résidu = 2,97).

Envie de continuer. La majorité des participants ont envie de continuer (94,91 %), avec une envie modérée pour 18,64 %, forte pour 36,44 % et très forte pour 39,83 %. Il y a une différence significative dans l'envie de continuer en fonction des groupes ($\chi^2(20, N = 118) = 34{,}34$, $p = 0{,}024$, coefficient de contingence = 0,47). Pour le groupe JV, il y a une sur-représentation des participants ayant une envie de continuer très faible (20 %, résidu = 3,80) et une sous-représentation des participants ayant une très forte envie de continuer (0 %, résidu = -3,37) et une envie modérée (40 %, résidu = 2,27).

Les résultats concernant la compliance, les intensités objectives et subjectives et le plaisir perçu sont récapitulés dans le Tableau 14.

Tableau 14. Récapitulatif des scores d'évolution des programmes (étude 4)

Mesure	Effets significatifs	Contrastes planifiés	Groupes contributifs (post hoc)
Compliance	—	—	—
Intensité physique objective (moyenne)	Groupe	Simultané > Cognitif	Tous les groupes > JV
Intensité physique objective (maximale)	Groupe	Simultané > Cognitif Incorporé > Additionnel Naturel > Virtuel	Tous les groupes > JV EM2I, AM2C, SWITCH > VÉLO-JV
Intensité physique subjective	Groupe	Simultané > Cognitif	Tous les groupes > JV
Intensité cognitive subjective	Groupe	Simultané > Physique Cognitif > Simultané Virtuel > Naturel	JV > EM2I, AM2C SWITCH > EM2I, AM2C VÉLO-JV > EM2I
Plaisir perçu	Groupe	Simultané > Physique, Cognitif	AM2C, EM2I, SWITCH > JV SWITCH, AM2C > VÉLO

Note. *GC : Groupe Contrôle ; Cognitif : entraînement cognitif (JV) ; Simultané : entraînement simultané (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; DTE : Dual-Task Effect (effet de double-tâche); Incorporé : entraînement incorporé (AM2C, EM2I, SWITCH) ; Naturel : entraînement simultané naturel (AM2C) ; Physique : entraînement physique (VÉLO) ; Additionnel : entraînement additionnel (VÉLO-JV) ; Virtuel : entraînement simultané virtuel (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; — : pas de différence significative.*

3.3.6. Corrélations

Plusieurs corrélations existent entre les intensités moyennes et maximales et l'intensité physique subjective, l'intensité cognitive subjective et le plaisir (Tableau 15). Plus particulièrement, l'intensité cognitive subjective semble négativement corrélée à l'intensité moyenne ($r = -0{,}25$, $p < 0{,}01$) et l'intensité maximale ($r = -0{,}23$, $p < 0{,}05$).

Tableau 15. Corrélations entre les paramètres d'intensité physique, de perception de l'effort et de plaisir (étude 4)

Variable		Intensité physique objective (moyenne)	Intensité physique objective (maximale)	Intensité physique subjective	Intensité cognitive subjective	Plaisir
Intensité physique objective (moyenne)	*r* de Pearson	—				
	p	—				
Intensité physique objective (maximale)	*r* de Pearson	**0,94**	—			
	p	**< 0,001**	—			
Intensité physique subjective	*r* de Pearson	**0,32**	**0,35**	—		
	p	**< 0,001**	**< 0,001**	—		
Intensité cognitive subjective	*r* de Pearson	**-0,25**	**-0,23**	0,16	—	
	p	**0,006**	**0,014**	0,078	—	
Plaisir	*r* de Pearson	**0,39**	**0,45**	0,02	-0,17	—
	p	**< 0,001**	**< 0,001**	0,829	0,067	—

3.4. Comparaison de l'effet des programmes en fonction des groupes

Cette étape vise à évaluer les effets des programmes d'intervention et à déterminer s'il existe des différences significatives d'évolution entre chaque groupe entre les pré-tests et les post-tests sur les capacités physiques, motrices, cognitives, et de DT.

3.4.1. Capacités physiques et motrices

Les scores obtenus aux pré-tests et post-tests, ainsi que les résultats des analyses post hoc pour les mesures physiques et motrices sont présentés dans le Tableau 16 et les analyses par contrastes figurent dans le Tableau 17. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour les variables suivantes : 30 secondes assis-debout, test de coordination et gratte-dos. Une transformation logarithmique a été appliquée à ces variables afin de corriger cette hétérogénéité. Toutefois, les variances demeurent inégales pour les données de gratte-dos, malgré la transformation.

Seuls les effets significatifs du *temps*, du *groupe* et de l'interaction *temps x groupe* des ANOVA sont rapportés dans le texte. Afin d'alléger la présentation des résultats, les effets non significatifs ne sont pas détaillés.

3.4.1.1. Capacités musculaires

Assis debout. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 128) = 74{,}87$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}06$) et du *groupe* ($F(6, 128) = 6{,}56$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 128) = 6{,}56$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$).

Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour :

- AM2C ($t(128) = 6{,}01$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}17$),
- EM2I ($t(128) = 5{,}55$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}66$),
- SWITCH ($t(128) = 6{,}73$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}13$),
- VÉLO ($t(128) = 3{,}62$, $p = 0{,}028$, $d = 1{,}19$).

De plus, alors que les post hoc ne montrent pas de différence entre ces groupes en pré-tests, il y a une différence significative entre les post-tests entre :

- AM2C et JV ($t(128) = 4{,}53$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}32$), EM2I et JV ($t(128) = 3{,}85$, $p = 0{,}01$, $d = 1{,}82$), SWITCH et JV ($t(128) = 4{,}73$, $p < 0{,}001$, $d = 2{,}29$),
- SWITCH et GC ($t(128) = 3{,}55$, $p = 0{,}033$, $d = 1{,}57$),
- SWITCH et VÉLO-JV ($t(128) = 3{,}47$, $p = 0{,}041$, $d = 1{,}54$).

Tableau 16. Résultats physiques et moteurs en pré-tests et post-tests en fonction du groupe (étude 4)

	AM2C		EM2I		SWITCH		VÉLO-JV		VÉLO		JV		GC	
	Pré-tests	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*
	M (ET)	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*
Capacités musculaires														
30 s assis-debout (n)	11,44 (2,34)	15,62 (3,54)***	12,09 (3,67)	15,09 (3,34)***	13,45 (4,59)	16,75 (3,34)***	15,50 (5,18)	15,45 (3,92)	15,16 (4,60)	16,47 (4,48)*	13,20 (3,47)	13,13 (3,83)	13,14 (2,80)	13,95 (2,46)
Handgrip (kg)	23,99 (7,28)	25,89 (7,63)	22,82 (7,88)	24,60 (8,04)	21,28 (4,85)	21,83 (4,95)	23,88 (7,21)	24,89 (6,02)	24,00 (6,17)	25,04 (5,47)	21,10 (4,76)	23,38 (7,16)	23,96 (7,86)	24,35 (6,65)
Lancer de medicine ball (cm)	289,25 (54,80)	318,19 (54,95)**	295,77 (68,38)	317,18 (75,14)*	276,19 (44,22)	279,14 (47,70)	292,04 (53,93)	285,77 (48,00)	285,78 (63,37)	293,28 (56,72)	298,85 (54,91)	298,36 (67,71)	298,85 (54,91)	303,00 (62,79)
Souplesse														
Sit-and-reach (cm)	19,78 (12,47)	20,75 (11,92)	16,13 (11,65)	19,20 (10,23)	24,52 (8,54)	24,86 (9,09)	20,92 (9,87)	21,42 (9,13)	18,29 (12,94)	19,80 (12,83)	16,10 (9,74)	15,67 (11,96)	18,86 (11,15)	20,00 (11,68)
Gratte-dos (cm)	-6,20 (11,14)	-4,84 (9,56)	-6,46 (7,08)	-3,84 (8,13)	-3,57 (5,80)	-3,22 (5,20)	-8,67 (11,66)	-7,87 (10,30)	-7,84 (9,34)	-6,83 (9,28)	-5,10 (7,50)	-5,70 (6,42)	-0,36 (6,38)	0,14 (7,85)
Équilibre														
TUG (s)	5,62 (0,63)	4,96 (0,44)**	6,06 (0,86)	5,25 (0,76)***	6,40 (1,20)	5,63 (0,89)***	6,22 (1,33)	5,63 (0,88)**	5,71 (0,85)	5,31 (0,82)	5,65 (0,85)	5,44 (0,96)	5,88 (0,70)	5,62 (0,65)
Coordination														
Test de coordination (s)	25,79 (5,29)	19,13 (4,55)***	29,82 (11,55)	20,74 (4,29)***	29,65 (9,57)	25,32 (7,21)**	30,30 (12,29)	27,31 (10,58)	26,92 (6,29)	25,15 (6,86)	25,01 (6,95)	22,89 (6,14)	26,55 (4,05)	24,93 (4,47)
Capacités aérobies														
TM6 (m)	602,34 (74,13)	632,81 (63,16)	553,37 (85,99)	602,61 (71,14)***	553,98 (81,08)	567,95 (108,22)	588,75 (66,55)	578,86 (68,76)	601,58 (78,84)	633,16 (78,63)	593,50 (103,30)	606,50 (102,67)	601,43 (69,13)	607,14 (75,02)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; cm : centimètre ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; m : mètre ; M : Moyenne ; n : nombre ; kg : kilogramme ; s : seconde ; TM6 : Test de Marche de 6 minutes ; TUG : Timed Up and Go ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

** $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, les résultats concernent les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests en post hoc.*

Une diminution des scores aux tests TUG et au test de coordination représente une amélioration de la performance.

Tableau 17. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests physiques et moteurs (étude 4)

	Simultané vs GC	Incorporé vs GC	Simultané vs Physique	Simultané vs Cognitif	Incorporé vs Additionnel	Naturel vs Virtuel
Capacités musculaires						
30 s assis-debout	**1,07****	**1,42*****	0,44	**1,79*****	**1,39*****	0,70
Handgrip	0,14	0,15	0,04	0,15	0,06	0,12
Lancer de medicine ball	0,13	**0,23***	0,07	0,18	**0,41*****	**0,39****
Souplesse						
Sit-and-reach	0,01	0,03	0,03	0,15	0,09	0,03
Gratte-dos	0,17	0,12	0,09	0,21	0,20	0,00
Équilibre						
TUG	**0,50***	**0,55****	**0,35[a]**	**0,56***	0,19	0,06
Coordination						
Test de coordination	**0,59*****	**0,75*****	**0,57*****	**0,52****	**0,63*****	**0,42***
Capacités aérobies						
TM6	0,19	**0,31***	0,13	0,10	**0,51****	0,16

***Note**. Additionnel : entraînement additionnel (VÉLO-JV) ; Cognitif : entraînement cognitif (JV) ; GC : Groupe Contrôle ; Incorporé : entraînement incorporé (AM2C, EM2I, SWITCH) ; Naturel : entraînement simultané naturel (AM2C) ; Physique : entraînement physique (VÉLO) ; Simultané : entraînement simultané (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; TM6 : Test de Marche de 6 minutes ; TUG : Timed Up and Go ; Virtuel : entraînement simultané virtuel (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV). ***** : p < 0,05, ****** p < 0,01, ******* : p < 0,001. **[a]** : indique une tendance significative (p = 0,06).*

Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent au d de Cohen.

Taille d'effet faible (0,20 ≤ d < 0,50)

Taille d'effet modérée (0,50 ≤ d < 0,80)

Taille d'effet forte (d ≥ 0,80)

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 32) indiquent que les entraînements simultané ($t(128) = 3,09$, $p = 0,002$, $d = 1,07$) et incorporé ($t(128) = 3,92$, $p < 0,001$, $d = 1,42$) sont significativement plus efficaces que le groupe contrôle. De plus, l'entraînement simultané s'avère plus efficace que l'entraînement cognitif ($t(128) = 4,50$, $p < 0,001$, $d = 1,79$), et l'entraînement incorporé plus efficace que l'additionnel ($t(128) = 4,50$, $p < 0,001$, $d = 1,39$).

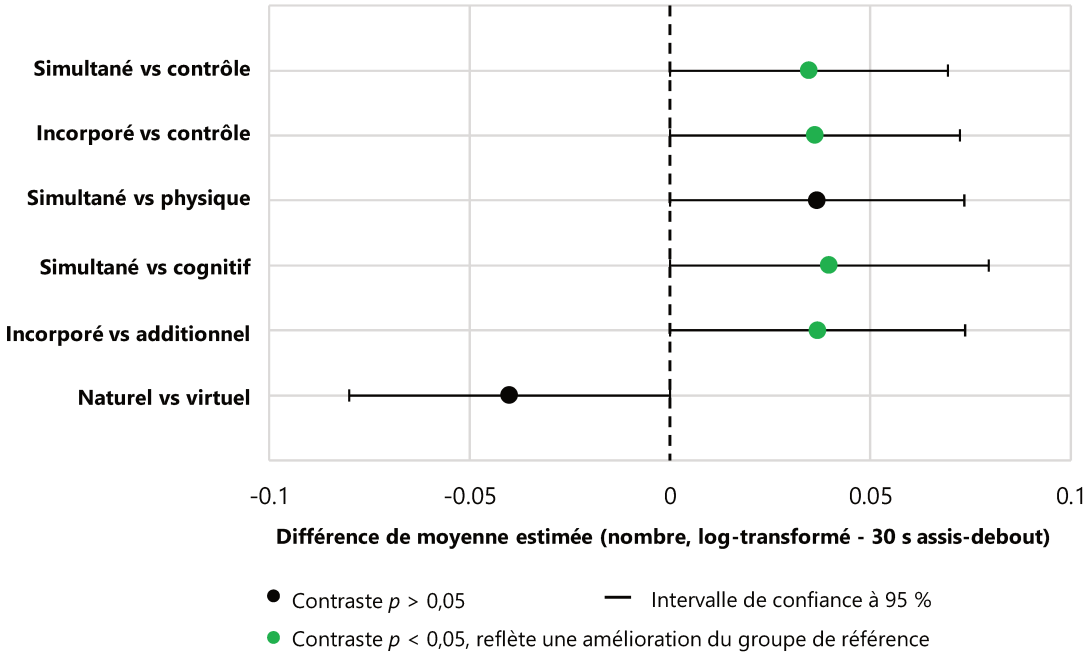


Figure 32. Différences d'évolution au test 30 secondes assis-debout en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée, sur des données log-transformées. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,4 unités qui correspond à une amélioration d'environ 4 % supplémentaires au test 30 secondes assis-debout pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Handgrip. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 131) = 25,40$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,009$). Aucun contraste n'est significatif.

Lancer de medicine ball. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 126) = 14,76$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,005$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 126) = 4,40$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,009$). Les post hoc indiquent une différence entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe AM2C ($t(126) = 4,57$, $p = 0,001$, $d = 0,49$) et EM2I ($t(128) = 3,96$, $p = 0,011$, $d = 0,37$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 33) indiquent que l'entraînement incorporé est plus efficace que le groupe contrôle ($t(126) = 2,07$, $p = 0,040$, $d = 0,23$) et l'entraînement additionnel ($t(126) = 3,79$, $p < 0,001$, $d = 0,41$) et que l'entraînement simultané naturel est plus efficace que l'entraînement virtuel ($t(126) = 3,24$, $p = 0,002$, $d = 0,39$).

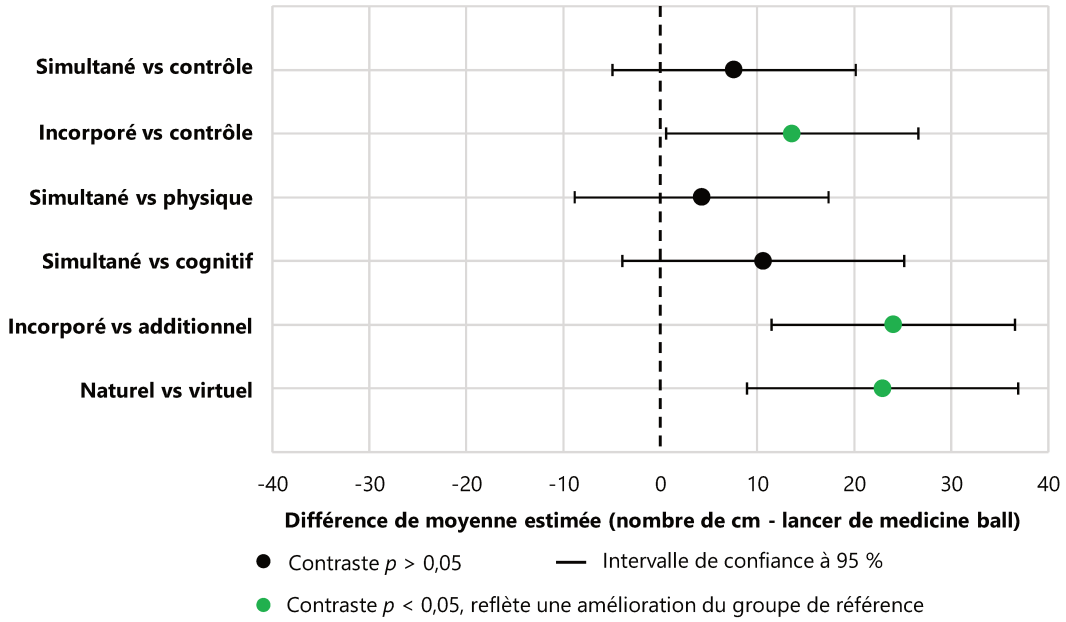


Figure 33. Différences d'évolution au test du lancer de medicine ball en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 8 unités qui correspond à une amélioration d'environ 8 cm supplémentaires au test lancer de medicine ball pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % n'est pas entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement non significative.*

3.4.1.2. Souplesse

Sit-and-reach. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 128) = 7,78$, $p = 0,006$, $\eta^2 = 0,002$). Aucun contraste n'est significatif.

Gratte-dos. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 125) = 4,84$, $p = 0,030$, $\eta^2 = 0,002$). Aucun contraste n'est significatif.

3.4.1.3. Équilibre

TUG. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 130) = 87,09$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 130) = 2,59$, $p = 0,021$, $\eta^2 = 0,014$). Effectivement, les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour :

- AM2C ($t(130) = 4,05$, $p = 0,007$, $d = 0,75$),
- EM2I ($t(130) = 5,93$, $p < 0,001$, $d = 0,92$),
- SWITCH ($t(130) = 5,38$, $p < 0,001$, $d = 0,87$),
- VÉLO-JV ($t(130) = 4,17$, $p = 0,005$, $d = 0,66$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 34) indiquent que les entraînements simultané ($t(130) = 2,75$, $p = 0,007$, $d = 0,50$) et incorporés ($t(130) = 2,89$, $p = 0,004$, $d = 0,55$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. L'entraînement simultané est plus efficace que l'entraînement cognitif ($t(130) = 2,68$, $p = 0,008$, $d = 0,56$). Il y a une tendance significative indiquant que l'entraînement simultané semble être plus efficace que l'entraînement physique ($t(130) = 1,86$, $p = 0,065$, $d = 0,35$).

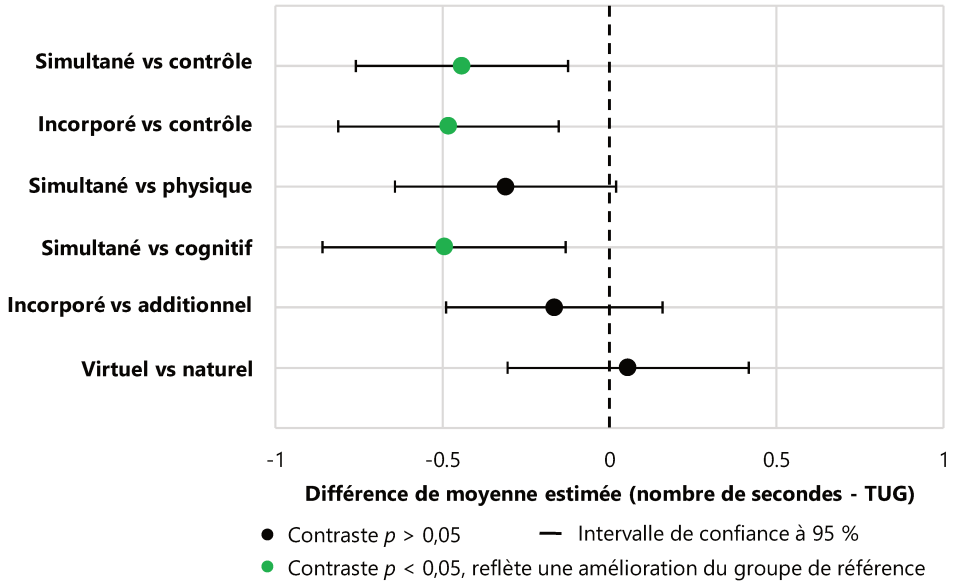


Figure 34. Différences d'évolution au test TUG en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Un score négatif représente ici une amélioration. Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée, sur des données log-transformées. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,4 unités qui correspond à une amélioration d'environ 0,4 seconde supplémentaire au test TUG pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.4.1.4. Coordination

Test de coordination des membres inférieurs. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 131) = 109,12$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 131) = 8,06$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,03$). Les analyses post hoc révèlent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour :

- AM2C ($t(131) = 6,86$, $p < 0,001$, $d = 1,17$),
- EM2I ($t(131) = 9,06$, $p < 0,001$, $d = 1,29$),
- SWITCH ($t(131) = 3,98$, $p = 0,009$, $d = 0,58$).

De plus, alors que les post hoc ne montraient pas de différence entre ces groupes en pré-tests, il y a une différence entre les post-tests entre AM2C et VÉLO-JV ($t(131) = 3,86$, $p = 0,014$, $d = 1,24$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 35) révèlent que les entraînements simultané ($t(131) = 3,57$, $p < 0,001$, $d = 0,59$) et incorporé ($t(131) = 4,35$, $p < 0,001$, $d = 0,75$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. L'entraînement simultané s'avère également supérieur aux entraînements physique ($t(131) = 3,28$, $p < 0,001$, $d = 0,57$) et cognitif ($t(131) = 2,72$, $p = 0,007$, $d = 0,52$). En outre, l'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel ($t(131) = 3,70$, $p < 0,001$, $d = 0,63$), et l'entraînement simultané naturel est plus efficace que l'entraînement simultané virtuel ($t(131) = 2,22$, $p = 0,028$, $d = 0,42$).

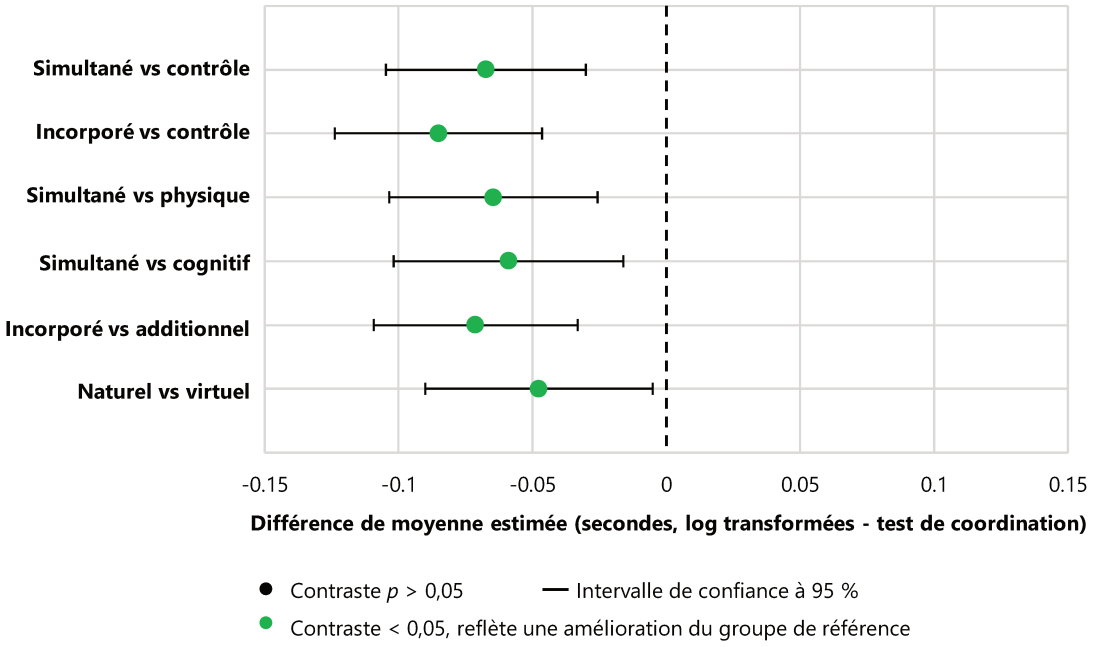


Figure 35. Différences d'évolution au test de coordination en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Un score négatif représente ici une amélioration. Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée, sur des données log-transformées. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,7 unités qui correspond à une amélioration d'environ 7 % supplémentaires au test de coordination pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement négatif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.4.1.5. Capacités aérobies

TM6. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 131) = 19,27$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,01$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 131) = 3,20$, $p = 0,006$, $\eta^2 = 0,01$). Les analyses post hoc révèlent une amélioration significative entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe EM2I ($t(131) = 4,66$, $p < 0,001$, $d = 0,61$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 36) indiquent que l'entraînement incorporé est plus efficace que le groupe contrôle ($t(131) = 1,98$, $p = 0,049$, $d = 0,31$) et que l'entraînement additionnel ($t(131) = 3,25$, $p = 0,001$, $d = 0,51$).

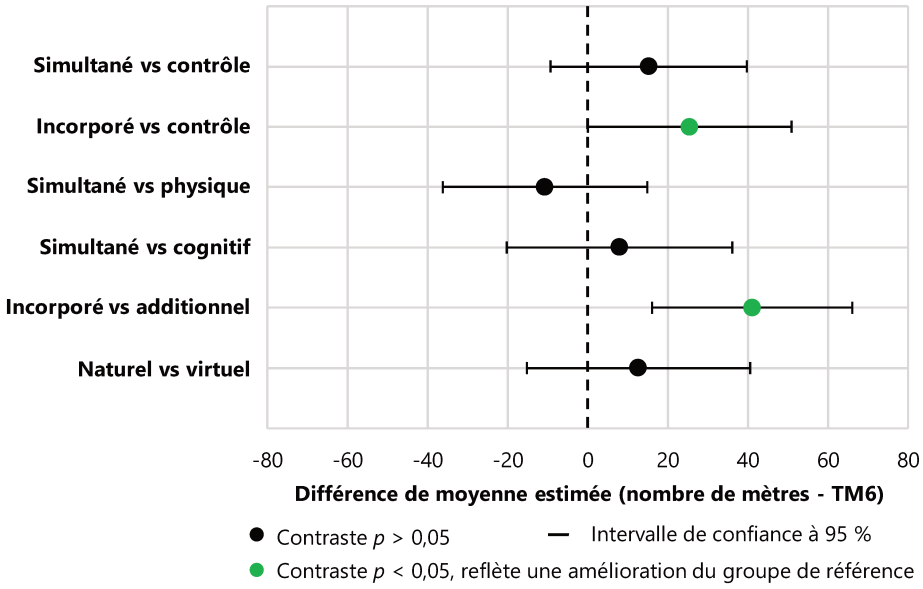


Figure 36. Différences d'évolution au TM6 en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *TM6 : test de marche de 6 minutes. Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 18 unités qui correspond à une amélioration d'environ 18 mètres supplémentaires au TM6 pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % n'est pas entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement non significative.*

3.4.2. Capacités cognitives

Les scores obtenus en pré-tests et en post-tests pour les capacités cognitives ainsi que les résultats des post hoc sont présentés dans le Tableau 18 et les analyses par contrastes planifiés figurent dans le Tableau 19. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour plusieurs scores : TR 2, TR 8 inhibitif, score inhibition, empan inverse, TMT B et TMT B-A. Afin de corriger cette hétérogénéité, une transformation logarithmique a été appliquée à ces variables. Malgré cette correction, les variances demeurent inégales pour les scores TR 2 et empan inverse.

Tableau 18. Résultats cognitifs en pré-tests et en post-tests en fonction du groupe (étude 4)

	AM2C		EM2I		SWITCH		VÉLO-JV		VÉLO		JV		GC	
	Pré-tests	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*	*Pré-tests*	*Post-tests*
	M (ET)	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*
Temps de réaction														
2 choix (ms)	1910,82	1931,56	1939,02	1878,26	1939,68	1876,00	1937,84	1939,77	1938,26	1936,07	1953,46	1923,63	1945,50	1923,69
	(102,36)	(74,56)	(75,27)	(74,76)***	(86,32)	(48,94)***	(87,79)	(79,64)	(42,92)	(52,56)	(107,26)	(52,57)	(59,01)	(68,12)
8 choix (ms)	2040,44	2024	2066,72	2016,33	2076,16	2029,36	2071,20	2078,11	2056,16	2022,00	2070,73	2061,53	2051,76	2031,98
	(96,26)	(78,23)	(99,95)	(96,80)	(95,36)	(118,89)	(115,12)	(103,37)	(89,18)	(85,78)	(117,02)	(94,79)	(75,81)	(65,96)
8 choix inhibitif (ms)	3430,94	3282,82	3254,76	3151,63	3314,02	3171,66	3411,86	3415,05	3241,68	3255,87	3280,67	3130,33	3210,55	3219,05
	(544,55)	(488,52)	(209,42)	(230,21)	(309,41)	(299,08)	(576,23)	(484,06)	(267,22)	(285,30)	(356,53)	(295,54)	(229,34)	(306,92)
Inhibition														
Score inhibition (ms)	1390,50	1258,50	1189,04	1135,30	1237,86	1142,30	1340,66	1336,93	1185,53	1233,87	1441,07	1068,80	1158,79	1187,07
	(53,39)	(45,67)	(19,87)	(21,43)	(28,86)	(23,92)	(52,98)	(43,37)	(23,27)	(28,24)	(52,88)	(29,16)**	(20,15)	(28,56)
Go/No-Go														
Temps - moyenne (ms)	481,00 (88,59)	476,70 (88,19)	462,39 (73,04)	499,80 (71,95)	470,68 (71,11)	476,91 (75,65)	456,91 (67,01)	458,73 (79,79)	470,16 (61,24)	460,79 (55,65)	488,07 (57,00)	473,53 (56,85)	462,52 (55,78)	453,24 (53,37)
Temps - ET (ms)	91,18 (26,91)	85,96 (34,71)	79,30 (26,75)	80,48 (23,48)	79,00 (22,82)	92,95 (31,70)	75,64 (24,38)	71,23 (21,95)	89,58 (23,55)	79,63 (21,72)	81,53 (30,14)	66,40 (22,82)	79,71 (41,85)	75,48 (31,14)
Erreurs (n)	1,88 (2,15)	1,59 (3,36)	1,91 (2,71)	1,61 (2,50)	2,05 (3,59)	1,77 (3,10)	1,96 (2,52)	0,91 (1,02)	1,68 (2,69)	1,58 (1,87)	1,33 (1,68)	0,87 (1,77)	1,52 (1,72)	0,91 (2,00)
Mémoire visuospatiale														
Empan simple (n)	6,76 (1,30)	6,94 (1,52)	6,43 (2,15)	7,39 (1,97)*	6,45 (1,57)	6,23 (1,41)	6,14 (1,04)	6,59 (0,73)	6,58 (1,22)	6,37 (1,38)	7,20 (1,70)	7,27 (1,49)	6,86 (1,06)	6,52 (1,54)
Empan inverse (n)	6,35 (2,23)	5,82 (2,27)	6,17 (1,67)	6,00 (1,13)	5,32 (1,46)	5,73 (1,70)	5,32 (1,36)	5,64 (1,43)	5,89 (1,24)	5,79 (1,99)	6,53 (1,77)	6,80 (1,57)	6,14 (1,06)	6,52 (1,50)
Flexibilité cognitive														
TMT B (s)	85,15 (80,50)	66,24 (38,46)	86,41 (54,62)	66,09 (34,37)*	83,38 (40,61)	84,44 (51,56)	80,88 (41,47)	73,36 (36,28)	63,08 (21,90)	58,48 (21,31)	63,88 (29,74)	56,29 (27,35)	60,57 (29,60)	81,33 (32,82)***
TMT B-A (s)	51,25 (71,75)	37,14 (25,98)	53,06 (44,96)	36,61 (25,88)	52,29 (40,11)	56,61 (48,01)	47,46 (33,25)	45,51 (31,79)	35,39 (20,09)	33,73 (19,45)	38,74 (28,99)	30,07 (23,33)	31,06 (25,08)	45,72 (32,26)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; M : Moyenne ; ms : milliseconde ; MVCT : Mémoire Visuospatiale à Court Terme ; MVDT : Mémoire Visuospatiale De Travail ; n : nombre ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; s : secondes ; TMT : Trail Making Test ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

** $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, les résultats concernent les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests en post hoc.*

Tableau 19. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests cognitifs (étude 4)

	Simultané vs GC *p* (*d*)	Incorporé vs GC *p* (*d*)	Simultané vs Physique *p* (*d*)	Simultané vs Cognitif *p* (*d*)	Incorporé vs Additionnel *p* (*d*)	Naturel vs Virtuel *p* (*d*)
Temps de réaction						
2 choix (ms)	0,04	0,17	0,31	0,04	**0,50***	**0,86*****
8 choix (ms)	0,07	0,18	0,08	0,18	**0,46***	0,14
8 choix inhibition (ms)	0,29	**0,39[a]**	0,32	0,15	**0,41***	0,18
Inhibition						
Score inhibition (ms)	0,25	0,32	0,35	**0,79****	0,29	0,20
Go/No-Go						
Temps - moyenne (ms)	0,15	0,15	0,16	0,23	0,00	0,21
Temps - ET (ms)	0,19	0,26	0,40	**0,58***	0,26	0,35
Erreurs (n)	0,06	0,13	0,15	0,01	0,31	0,10
MVCT et MVDT						
Empan simple (n)	**0,45***	**0,43***	0,37	0,18	0,10	0,15
Empan inverse (n)	0,13	0,18	0,27	0,12	0,21	0,43
Flexibilité mentale						
TMT B (s)	**0,95*****	**0,94*****	0,07	0,06	0,10	0,05
TMT B-A (s)	**0,49***	**0,56***	0,11	0,49	0,04	0,25

Note. *Additionnel : entraînement additionnel (VÉLO-JV) ; Cognitif : entraînement cognitif (JV) ; ET : Écart-Type ; GC : Groupe Contrôle MVCT : Mémoire Visuospatiale à Court Terme : MVDT : Mémoire Visuospatiale De Travail ; Incorporé : entraînement incorporé (AM2C, EM2I, SWITCH) ; Naturel : entraînement simultané naturel (AM2C) ; Physique : entraînement physique (VÉLO) ; s : seconde ; ms : milliseconde ; n : nombre ; TMT : Trail Making Test ; Simultané : entraînement simultané (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; Virtuel : entraînement simultané virtuel (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV).* **[a]** *: indique une tendance significative (p = 0,06).* ***** *: p < 0,05,* ****** *p < 0,01,* ******* *: p < 0,001.*

Les résultats ***soulignés*** *sont ceux infirmant l'hypothèse de départ (e.g., Cognitif > Simultané pour le score d'inhibition).*

Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent au d de Cohen.

Taille d'effet faible (0,20 ≤ d < 0,50)

Taille d'effet modérée (0,50 ≤ d < 0,80)

Taille d'effet forte (d ≥ 0,80)

3.4.2.1. Temps de réaction

Temps de réaction à 2 choix. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 16{,}38$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}02$) ainsi qu'une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 132) = 5{,}34$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}04$). Les analyses post hoc indiquent que le groupe EM2I et SWITCH sont en grande partie à l'origine de cette différence, avec une amélioration significative entre les pré-tests et les post-tests pour EM2I ($t(132) = 4{,}69$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}84$) et SWITCH ($t(132) = 4{,}72$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}86$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 37) montrent que l'amélioration est significativement plus marquée pour l'entraînement incorporé qu'additionnel ($t(132) = 2{,}33$, $p = 0{,}021$, $d = 0{,}50$), et que l'entraînement simultané virtuel produit de meilleurs résultats que l'entraînement simultané naturel ($t(132) = 3{,}69$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}86$).

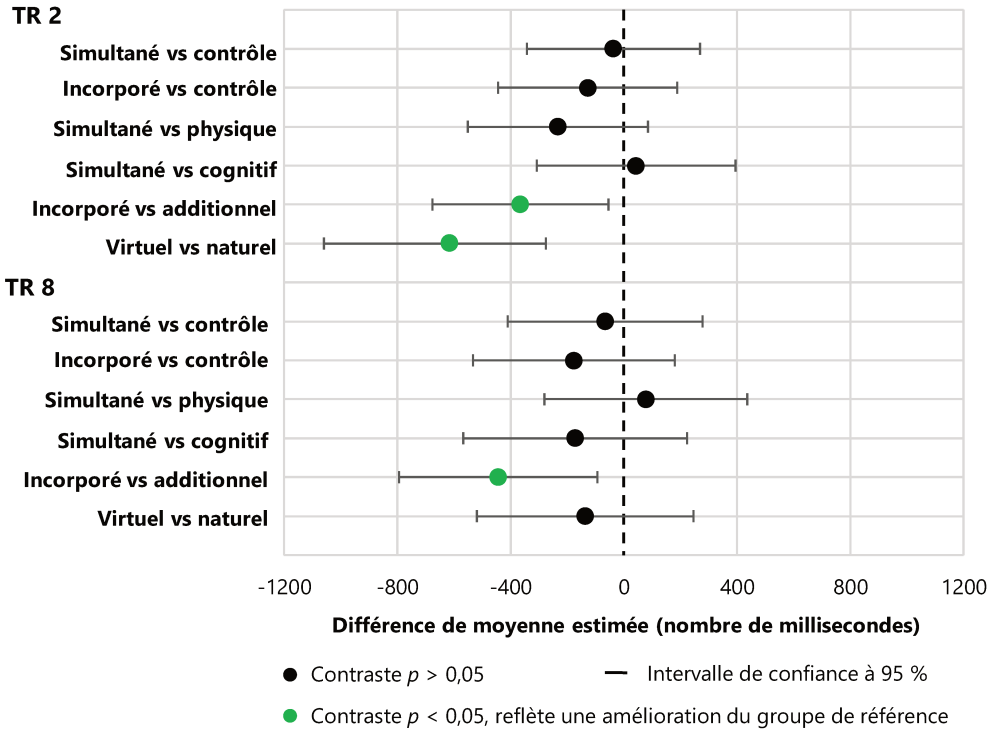


Figure 37. Différences d'évolution aux TR 2 et TR 8 en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Un score négatif représente ici une amélioration. TR 2 : Temps de Réaction à 2 choix ; TR 8 : Temps de Réaction à 8 choix. Un score négatif représente ici une amélioration. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : pour le TR 2, le contraste entre les entraînements simultané et physique révèle une différence de moyenne estimée d'environ 200 unités qui correspond à une amélioration d'environ 200 millisecondes supplémentaires au TR 2 pour l'entraînement simultané par rapport à l'entraînement physique. L'intervalle de confiance à 95% n'est pas entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement non significative.*

Temps de réaction à 8 choix. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 15{,}55$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}02$), sans effet significatif du groupe ni d'interaction *temps* × *groupe*.

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 37) mettent en évidence une augmentation significativement plus marquée de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel ($t(132) = 2{,}50$, $p = 0{,}014$, $d = 0{,}46$), suggérant un effet spécifique de cette modalité.

Temps de réaction à 8 choix inhibitif. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 9{,}18$, $p = 0{,}003$, $\eta^2 = 0{,}01$).

Contrastes. Les contrastes planifiés indiquent que l'entraînement incorporé évolue positivement en comparaison à l'entraînement additionnel ($t(132) = 2{,}00$, $p = 0{,}047$, $d = 0{,}41$). De plus, il y a une tendance significative entre l'entraînement incorporé et le groupe contrôle ($t(132) = 1{,}86$, $p = 0{,}065$, $d = 0{,}39$).

3.4.2.2. Inhibition

Score d'inhibition. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 8{,}66$, $p = 0{,}004$, $\eta^2 = 0{,}01$) ainsi qu'une interaction *temps x groupe* ($F(6, 132) = 2{,}76$, $p = 0{,}015$, $\eta^2 = 0{,}03$). L'analyse post hoc indique que le groupe JV a progressé entre les pré-tests et les post-tests ($t(132) = 4{,}12$, $p = 0{,}006$, $d = 1{,}00$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 38) indiquent que l'entraînement cognitif est plus efficace que l'entraînement simultané ($t(132) = 3{,}00$, $p = 0{,}003$, $d = 0{,}79$).

Go/No-Go (temps de réaction-moyenne). Il n'y a aucune différence significative (ANOVA et contrastes planifiés).

Go/No-Go (temps de réaction–écart-type). Il y a une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 132) = 2{,}18$, $p = 0{,}048$, $\eta^2 = 0{,}02$). Les analyses post hoc ne révèlent aucune différence significative.

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 39) montrent que l'entraînement cognitif est associé à une réduction plus importante de la variabilité des temps de réaction que l'entraînement simultané ($t(132) = 2{,}09$, $p = 0{,}038$, $d = 0{,}58$).

Go/No-Go (erreurs). Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 4{,}93$, $p = 0{,}028$, $\eta^2 = 0{,}01$).

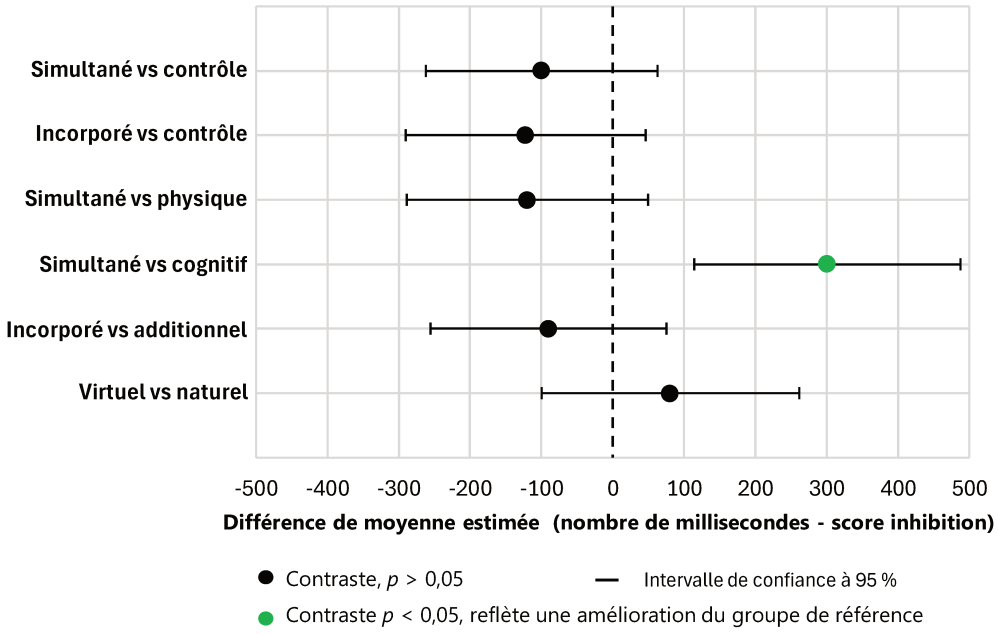


Figure 38. Différences d'évolution au score inhibition en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Un score négatif représente ici une amélioration. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs cognitif : le contraste entre les groupes simultané et cognitif révèle une différence de moyenne estimée d'environ 300 unités qui correspond à une amélioration d'environ 300 millisecondes supplémentaires au score inhibition pour l'entraînement cognitif par rapport à l'entraînement simultané. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

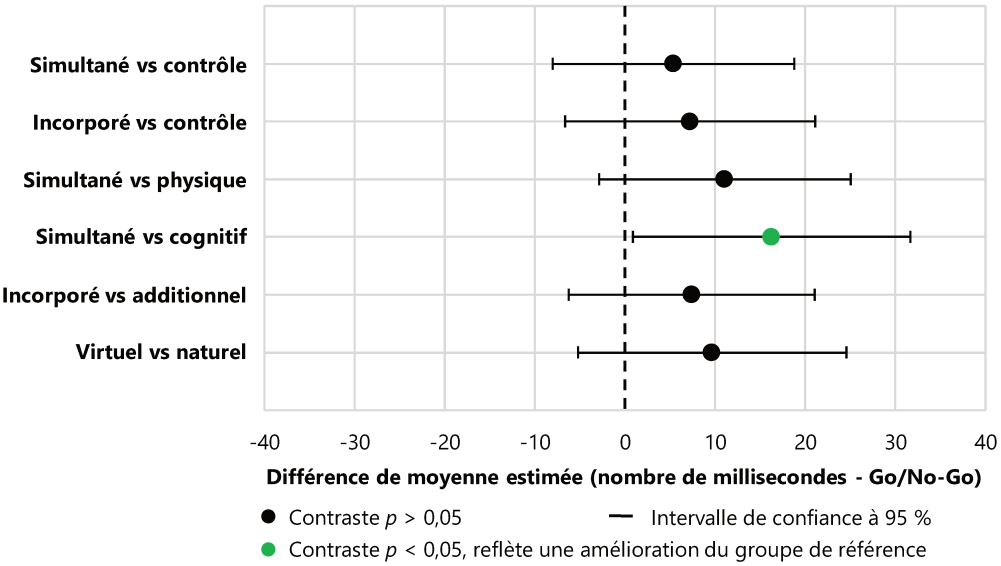


Figure 39. Différences d'évolution à l'écart-type du test Go/No-Go en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Un score négatif représente ici une amélioration. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs cognitif : le contraste entre les entraînements simultané et cognitif révèle une différence de moyenne estimée d'environ 15 unités qui correspond à une amélioration d'environ 15 millisecondes supplémentaires de la variabilité au test Go/No-Go pour le groupe Cognitif par rapport au groupe Simultané. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.4.2.3. Mémoire visuospatiale à court terme et de travail

Mémoire Visuospatiale à Court Terme (MVCT). Il y a une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 132) = 2,99$, $p = 0,009$, $\eta^2 = 0,02$). Le groupe EM2I semble être le principal groupe à l'origine de cette différence puisque les analyses post hoc indiquent qu'il s'améliore entre les pré-tests et les post-tests ($t(132) = 3,69$, $p = 0,029$, $d = 0,64$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 40) révèlent les entraînements simultané ($t(132) = 2,22$, $p = 0,028$, $d = 0,45$) et incorporé ($t(132) = 2,02$, $p = 0,045$, $d = 0,43$) génèrent une amélioration plus marquée que celle observée dans le groupe contrôle.

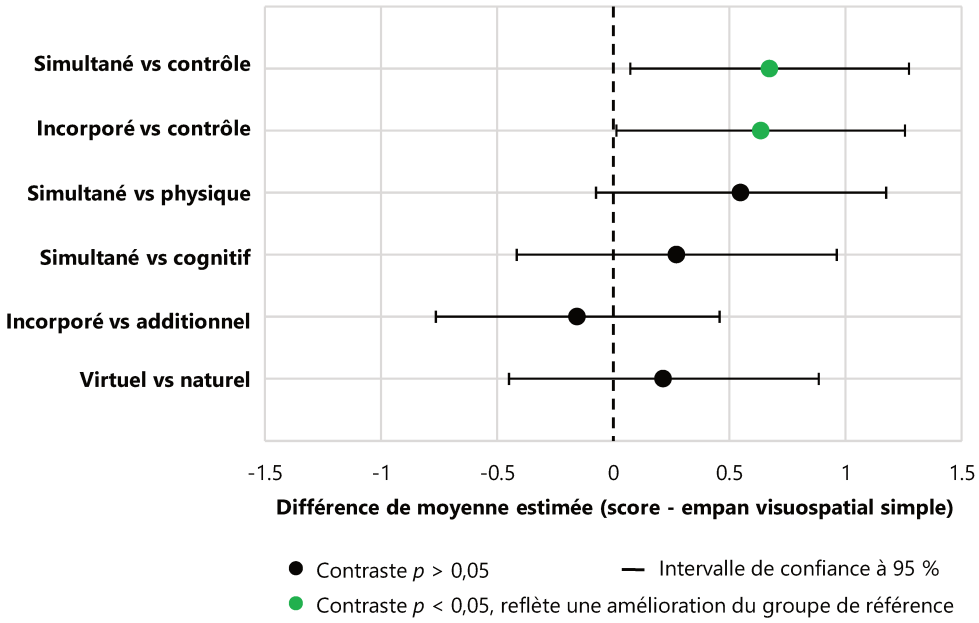


Figure 40. Différences d'évolution à l'empan visuospatial simple en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,6 unité qui correspond à une amélioration d'environ 0,6 points supplémentaires au score d'empan visuospatial simple pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Mémoire Visuospatiale De Travail (MVDT). Il n'y a aucune différence significative (ANOVA et contrastes planifiés).

3.4.2.4. Flexibilité cognitive

TMT B. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 4{,}62$, $p = 0{,}033$, $\eta^2 = 0{,}01$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 132) = 6{,}79$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$). Les analyses post hoc indiquent que le groupe EM2I présente une progression notable entre les pré-tests et les post-tests ($t(132) = 3{,}64$, $p = 0{,}035$, $d = 0{,}51$), tandis que le GC régresse ($t(132) = 4{,}65$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}69$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés révèlent que les entraînements simultané ($t(132) = 5{,}73$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}95$) et incorporé ($t(132) = 5{,}53$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}94$) sont plus efficaces que le groupe contrôle.

TMT B-A. Il y a une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 132) = 2{,}42$, $p = 0{,}030$, $\eta^2 = 0{,}02$). Il n'y a pas de différence significative en post hoc.

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 41) indiquent que les entraînements simultané ($t(132) = 2{,}11$, $p = 0{,}036$, $d = 0{,}49$) et incorporé ($t(132) = 2{,}32$, $p = 0{,}022$, $d = 0{,}56$) sont plus efficaces que le groupe contrôle.

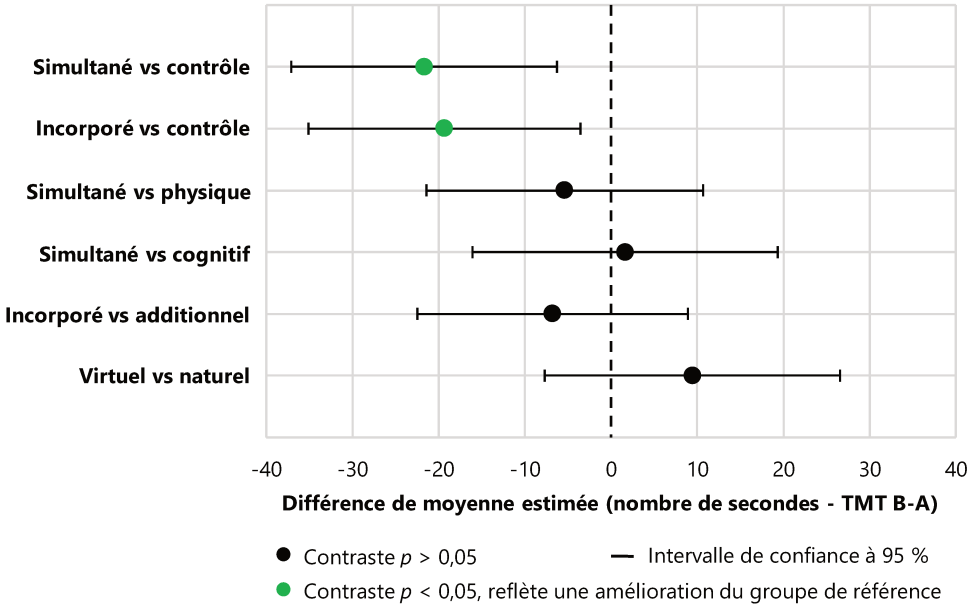


Figure 41. Différences d'évolution au TMT B-A en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Un score négatif représente ici une amélioration. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 21 unités qui correspond à une amélioration d'environ 21 secondes supplémentaires au score TMT B-A pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.4.3. Double-tâche

Les données descriptives des ST, DT et DTE et les résultats des post hoc sont donnés dans le Tableau 20 et les résultats des contrastes planifiés sont indiqués dans le Tableau 21. L'égalité des variances était violée pour le score de comptage sonore, en ST, DT et DTE, ainsi que pour le score de décompte en ST, le score Go/No-Go (erreurs) en DT, le score de STEP en ST. Les données ont donc été transformées logarithmiquement pour ces variables. Malgré la correction, les variances demeurent inégales pour le score de la tâche de décompte en ST et le score de STEP en ST.

3.4.3.1. Cognitivo-cognitive

- **Tâche cognitive 1 : tâche Go/No-Go**

ST. Les résultats sont indiqués dans la partie 3.4.2.2.

DT. Il n'y a aucune différence significative (ANOVA et contrastes planifiés) pour le temps (moyenne). Il y a un effet du *temps* pour le nombre d'erreurs ($F(1, 132) = 9,91$, $p = 0,002$, $\eta^2 = 0,02$) et pour le temps (écart-type, $F(1, 132) = 6,75$, $p = 0,010$, $\eta^2 = 0,02$). Aucun contraste n'est significatif.

DTE. Il n'y a aucune différence significative (ANOVA et contrastes planifiés) pour le temps (moyenne) et le nombre d'erreurs. Pour le temps (écart-type), il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 132) = 4,22$, $p = 0,04$, $\eta^2 = 0,01$), mais aucun contraste n'est significatif.

- **Tâche cognitive 2 : tâche de comptage sonore**

ST. Il n'y a aucune différence significative.

DT. Il y a un effet du *temps* ($F(1, 131) = 13,40$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,03$). Aucun contraste n'est significatif.

DTE. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 130) = 20,23$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,03$). Aucun contraste n'est significatif.

Tableau 20. Résultats en ST, DT et DTE en fonction des groupes (étude 4)

	AM2C		EM2I		SWITCH		VÉLO-JV		VÉLO		JV		GC	
	Pré-test	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**	**Pré-test**	**Post-test**
	M (ET)	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*	*M (ET)*
DT cognitive-cognitive														
Go/No-Go														
ST														
Temps - moyenne (ms)	481,00 (88,59)	476,70 (88,19)	462,39 (73,04)	499,80 (71,95)	470,68 (71,11)	476,91 (75,65)	456,91 (67,01)	458,73 (79,79)	470,16 (61,24)	460,79 (55,65)	488,07 (57,00)	473,53 (56,85)	462,52 (55,78)	453,24 (53,37)
Temps - écart-type (ms)	91,18 (26,91)	85,96 (34,71)	79,30 (26,75)	80,48 (23,48)	79,00 (22,82)	92,95 (31,70)	75,64 (24,38)	71,23 (21,95)	89,58 (23,55)	79,63 (21,72)	81,53 (30,14)	66,40 (22,82)	79,71 (41,85)	75,48 (31,14)
Erreurs (n)	1,88 (2,15)	1,59 (3,36)	1,91 (2,71)	1,61 (2,50)	2,05 (3,59)	1,77 (3,10)	1,96 (2,52)	0,91 (1,02)	1,68 (2,69)	1,58 (1,87)	1,33 (1,68)	0,87 (1,77)	1,52 (1,72)	0,91 (2,00)
DT														
Temps - moyenne (ms)	569,77 (112,37)	585,77 (127,37)	584,61 (118,80)	577,26 (115,62)	590,50 (91,99)	580,77 (112,81)	597,50 (156,82)	555,82 (89,31)	604,58 (135,87)	589,16 (115,83)	582,87 (77,79)	569,40 (82,88)	573,86 (115,43)	540,00 (78,19)
Temps - écart-type (ms)	141,41 (41,72)	146,12 (58,90)	184,96 (97,84)	164,26 (95,19)	166,82 (65,41)	142,64 (64,78)	165,77 (85,52)	131,86 (63,72)	157,84 (71,97)	148,95 (66,03)	155,80 (42,50)	141,53 (67,88)	157,57 (80,42)	125,29 (53,41)
Erreurs (n)	3,77 (5,31)	2,59 (4,02)	3,35 (3,28)	3,83 (5,17)	2,96 (3,11)	2,00 (2,02)	2,91 (2,31)	2,41 (1,94)	1,95 (1,65)	2,26 (3,56)	2,93 (2,92)	1,20 (1,74)	2,81 (2,77)	1,52 (1,97)
DTE														
Temps - moyenne (ms)	-0,19 (0,15)	-0,19 (0,16)	-0,23 (0,19)	-0,24 (0,22)	-0,26 (0,17)	-0,22 (0,19)	-0,31 (0,28)	-0,21 (0,22)	-0,29 (0,26)	-0,27 (0,21)	-0,19 (0,16)	-0,20 (0,17)	-0,24 (0,24)	-0,27 (0,21)
Temps - écart-type (ms)	-0,55 (0,54)	-0,67 (0,64)	-1,33 (1,37)	-1,06 (1,22)	-1,11 (0,81)	-0,63 (0,81)	-1,19 (1,16)	-0,80 (0,82)	-0,86 (1,02)	-0,87 (0,87)	-0,91 (0,50)	-0,92 (0,86)	-0,98 (0,87)	-0,63 (0,69)
Erreurs (n)	-1,00 (2,42)	-0,53 (0,84)	-0,75 (1,85)	-1,16 (2,39)	-0,44 (1,35)	-0,11 (1,36)	-0,49 (1,59)	-0,77 (1,06)	-0,16 (1,82)	-0,41 (2,46)	-1,20 (1,96)	-0,25 (1,16)	-0,86 (1,97)	-0,40 (2,46)
Comptage sonore														
ST *(n)*	0,71 (2,17)	0,41 (1,00)	1,00 (2,15)	0,56 (1,12)	0,82 (2,17)	0,41 (0,96)	1,50 (3,10)	1,95 (3,63)	1,05 (1,81)	0,74 (1,91)	0,80 (1,61)	0,20 (0,41)	1,00 (2,41)	0,60 (1,19)
DT *(n)*	5,29 (5,27)	2,41 (3,47)	4,91 (4,56)	2,78 (2,59)	5,41 (6,62)	3,46 (5,38)	4,96 (5,98)	4,09 (6,20)	2,84 (2,43)	2,21 (2,15)	3,00 (2,42)	2,40 (2,50)	3,60 (4,81)	2,45 (3,09)
DTE *(n)*	-6,46 (6,57)	-2,82 (5,41)	-3,91 (4,41)	-2,22 (2,37)	-5,60 (6,79)	-3,71 (6,72)	-2,30 (2,89)	-1,42 (4,06)	-1,70 (2,94)	-1,40 (2,36)	-2,75 (2,96)	-2,75 (2,96)	-2,60 (4,08)	-1,85 (3,08)
DT cognitive-motrice														
Décompte														
ST *(n)*	9,59 (5,99)	10,12 (6,52)	12,61 (6,21)	13,39 (5,60)	8,77 (6,49)	8,86 (5,18)	8,91 (5,33)	10,18 (6,25)	11,90 (8,38)	12,53 (8,92)	12,93 (9,69)	15,80 (11,82)	13,20 (7,06)	13,05 (6,32)
DT *(n)*	7,69 (6,07)	10,31 (7,82)	9,26 (5,56)	12,96 (7,13)	7,75 (5,74)	8,70 (6,72)	6,91 (4,97)	9,18 (5,67)	10,21 (8,09)	11,95 (10,34)	11,13 (8,91)	12,67 (11,51)	10,05 (5,76)	11,33 (7,65)
DTE *(n)*	-0,26 (0,35)	-0,05 (0,35)	-0,27 (0,34)	-0,03 (0,28)	-0,17 (0,34)	-0,11 (0,43)	-0,22 (0,22)	-0,11 (0,42)	-0,14 (0,33)	-0,05 (0,39)	-0,14 (0,24)	-0,24 (0,25)	-0,23 (0,25)	-0,12 (0,27)
STEP														
ST *(n)*	31,81 (5,38)	39,88 (6,17)***	30,13 (7,51)	38,78 (7,53)***	28,71 (6,63)	35,52 (6,81)***	33,64 (10,4)	32,32 (8,21)	34,11 (8,81)	36,47 (8,32)	32,20 (8,63)	33,47 (8,03)	31,86 (5,19)	33,62 (4,59)
DT *(n)*	19,25 (5,54)	23,88 (6,65)	20,59 (6,01)	25,73 (7,41)**	19,21 (7,37)	24,00 (6,10)*	19,09 (8,01)	21,00 (8,61)	21,00 (6,86)	23,84 (7,85)	18,40 (8,63)	21,87 (8,97)	20,56 (7,51)	20,61 (8,80)
DTE *(n)*	-0,41 (0,14)	-0,52 (0,16)	-0,32 (0,26)	-0,42 (0,22)	-0,34 (0,24)	-0,39 (0,22)	-0,43 (0,22)	-0,34 (0,22)	-0,38 (0,18)	-0,37 (0,19)	-0,43 (0,22)	-0,36 (0,20)	-0,38 (0,25)	-0,41 (0,28)

Note. *DT : Double-Tâche ; DTE : Dual-Task Effect (effet de double-tâche) ; ET : Écart-Type ; M : Moyenne, ms : milliseconde ; n : nombre ; ST : Simple-Tâche.*

** p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001, les résultats concernent les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests en post hoc.*

Tableau 21. Analyses par contrastes planifiés pour les évolutions entre les pré-tests et les post-tests pour les DTE (étude 4)

	Simultané vs GC	Incorporé vs GC	Simultané vs Physique	Simultané vs Cognitif	Incorporé vs Additionnel	Naturel vs Virtuel
DTE cognitivo-cognitive						
Go/No-Go						
Temps – moyenne	0,13	0,24	0,07	0,14	0,45	0,22
Temps – écart-type	0,10	0,15	0,29	0,29	0,19	0,54
Erreurs (n)	0,24	0,18	0,16	0,52	0,23	0,33
Comptage sonore (n)	0,03	0,19	0,14	0,24	0,62	0,13
DTE cognitivo-motrice						
Décompte (n)	0,14	0,18	0,18	**0,79[a]**	0,17	0,25
STEP (n)	0,05	0,26	0,26	**0,51[a]**	**0,85*** **	0,42

Note. *Additionnel : entraînement additionnel (VÉLO-JV) ; Cognitif : entraînement cognitif seul (JV) ; GC : Groupe Contrôle ; Incorporé : entraînement incorporé (AM2C, EM2I, SWITCH) ; Naturel : entraînement simultané naturel (AM2C) ; Physique : entraînement physique seul (VÉLO) ; Simultané : entraînement simultané (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; Virtuel : entraînement simultané virtuel (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV). *** : p < 0,001. [a] : indique une tendance significative (p = 0,06).*

*Les résultats **soulignés** sont ceux infirmant l'hypothèse de départ (e.g., Additionnel > Incorporé pour le DTE STEP).*

Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent au d de Cohen.

Taille d'effet faible (0,20 ≤ d < 0,50)

Taille d'effet modérée (0,50 ≤ d < 0,80)

Taille d'effet forte (d ≥ 0,80)

3.4.3.2. Cognitivo-motrice

- **Tâche motrice : STEP**

ST. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 130) = 81{,}63$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}06$) et une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 130) = 10{,}62$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}05$). Les post hoc révèlent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour :

- AM2C ($t(130) = 5{,}84$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}00$),
- EM2I ($t(130) = 8{,}10$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}15$),
- SWITCH ($t(130) = 6{,}38$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}95$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés indiquent que les entraînements simultané ($t(130) = 2{,}94$, $p = 0{,}004$, $d = 0{,}49$) et incorporé ($t(130) = 2{,}38$, $p = 0{,}019$, $d = 0{,}41$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. L'entraînement simultané est également plus efficace que les entraînement physique ($t(130) = 2{,}48$, $p = 0{,}014$, $d = 0{,}43$) et cognitif ($t(130) = 2{,}91$, $p = 0{,}004$, $d = 0{,}56$). L'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel ($t(130) = 6{,}76$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}15$).

DT. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 124) = 44{,}04$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}04$) et une interaction avec une tendance significative *temps x groupe* ($F(6, 124) = 2{,}04$, $p = 0{,}065$, $\eta^2 = 0{,}01$). Les post hoc révèlent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour :

- EM2I ($t(124) = 4{,}32$, $p = 0{,}003$, $d = 0{,}68$),
- SWITCH ($t(124) = 3{,}75$, $p = 0{,}025$, $d = 0{,}64$).

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés indiquent que les entraînements simultané ($t(124) = 2{,}78$, $p = 0{,}006$, $d = 0{,}54$) et incorporé ($t(124) = 3{,}17$, $p = 0{,}002$, $d = 0{,}64$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. L'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel ($t(124) = 2{,}10$, $p = 0{,}038$, $d = 0{,}39$).

DTE. Il y a une interaction significative *temps x groupe* ($F(6, 123) = 2{,}94$, $p = 0{,}010$, $\eta^2 = 0{,}03$). Toutefois, les analyses post hoc n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre les groupes.

Contrastes. Les analyses par contrastes planifiés (Figure 42) indiquent que l'entraînement additionnel est plus efficace que l'incorporé ($t(123) = 1{,}93$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}85$). Il y a également une tendance significative ($t(123) = 1{,}91$, $p = 0{,}057$, $d = 0{,}51$) pour la comparaison entre l'entraînement simultané et l'entraînement cognitif, indiquant que l'entraînement cognitif semble réduire son DTE par rapport à l'entraînement simultané.

- **Tâche cognitive : décompte**

ST. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 131) = 3{,}89$, $p = 0{,}050$, $\eta^2 = 0{,}01$). Aucun contraste n'est significatif.

DT. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 129) = 27{,}98$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}02$). Aucun contraste n'est significatif.

DTE. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1, 129) = 6{,}15$, $p = 0{,}014$, $\eta^2 = 0{,}03$).

Contrastes. Aucun contraste n'est significatif (Figure 42), par ailleurs, il y a une tendance significative ($t(129) = 1{,}93$, $p = 0{,}056$, $d = 0{,}79$) pour la comparaison entre l'entraînement simultané et l'entraînement cognitif, indiquant que l'entraînement cognitif semble augmenter son DTE par rapport à l'entraînement simultané.

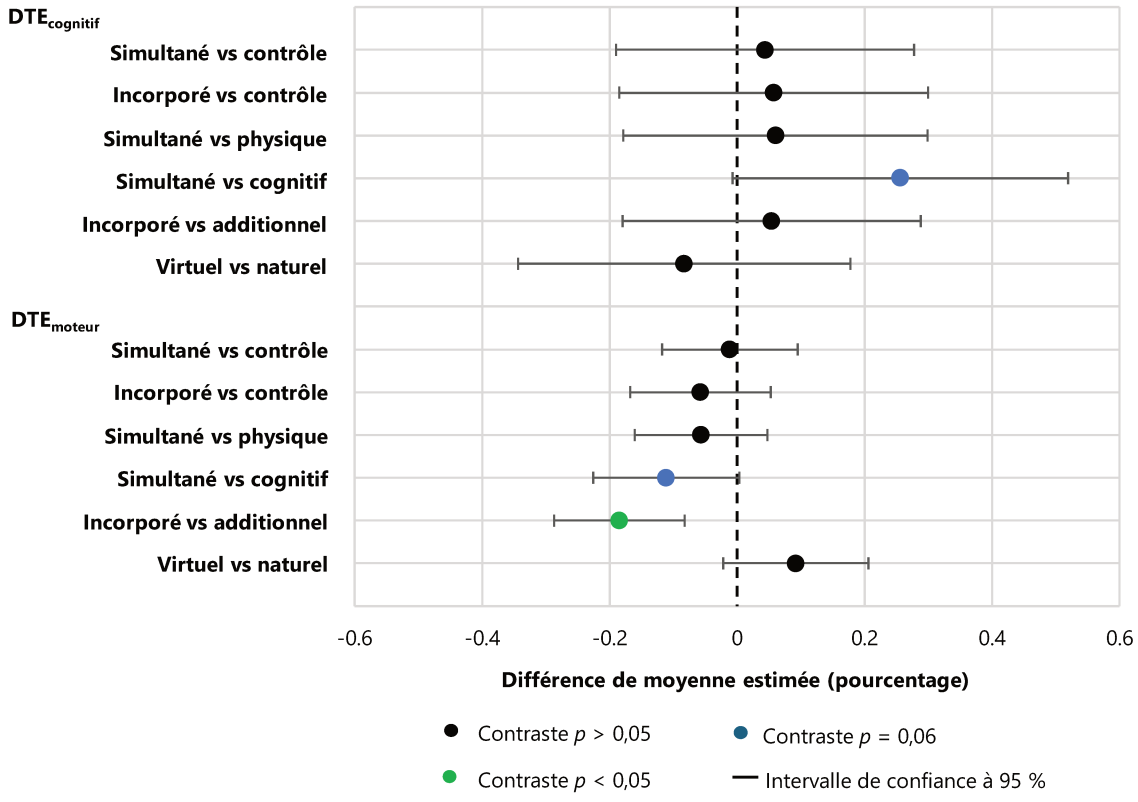


Figure 42. Différences d'évolution aux DTE moteur et cognitif en fonction des comparaisons expérimentales (étude 4)

Note. *$DTE_{cognitif}$: effet de la double-tâche sur la performance cognitive : DTE_{moteur} : effet de la double-tâche sur la performance motrice. Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Exemple de lecture pour le contraste incorporé vs additionnel : pour le DTE_{moteur}, le contraste entre les entraînements incorporé vs additionnel révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,2 unités qui correspond à une diminution d'environ 20 % d'interférence supplémentaires au DTE_{moteur} pour le groupe incorporé par rapport au groupe additionnel. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Ainsi, l'entraînement cognitif semble avoir modifié la priorisation de la tâche, puisque lorsqu'il est comparé à l'entraînement simultané, il semble diminuer le DTE moteur (i.e., plus d'interférence) et augmenter le DTE cognitif (i.e., moins d'interférence).

3.5. Prédiction de l'évolution cognitive par les évolutions physiques

Des régressions multiples ont été réalisées afin de prédire l'évolution des scores cognitifs à partir de l'évolution de la condition physique. L'ensemble des résultats est présenté en Annexe 23.

Seul le modèle expliquant l'évolution de la flexibilité cognitive (Figure 43) est significatif ($F(5, 128) = 3,35$, $p = 0,007$) et explique 11,6 % de la variance ($R^2 = 0,116$). Les évolutions de la coordination ($\beta = 0,201$, $t = 2,22$, $p = 0,028$) et des capacités aérobies ($\beta = 0,170$, $t = 2,00$, $p = 0,047$) sont significativement associées à l'évolution de la flexibilité cognitive. Les autres variables (30 secondes assis-debout, souplesse du bas du corps, TUG) ne montrent pas d'association significative avec l'évolution de la flexibilité cognitive ($p > 0,05$). Les statistiques de colinéarité sont correctes, avec des valeurs de VIF comprises entre 1,044 et 1,183, indiquant l'absence de colinéarité problématique entre les variables indépendantes.

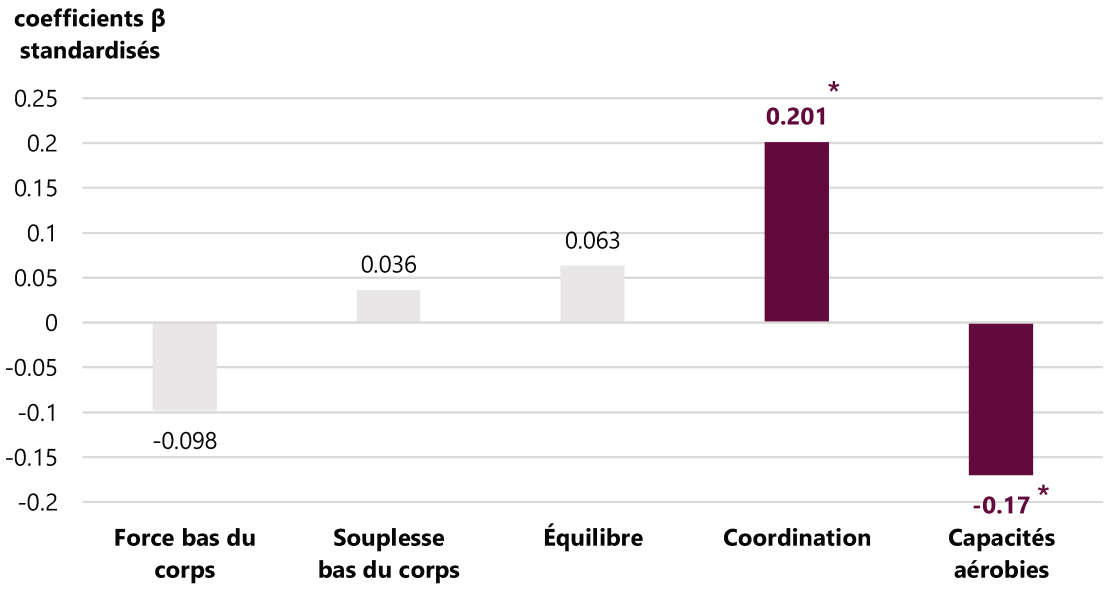


Figure 43. Modèle de régression multiple pour prédire l'évolution de la flexibilité cognitive (étude 4)

Note. *Les scores de flexibilité cognitive (TMT B-A), d'équilibre et de coordination sont des temps, une diminution de leur temps représente une amélioration. Ainsi, un coefficient β standardisé positif entre la coordination et la flexibilité cognitive représente une association positive entre une meilleure coordination (réduction du temps) et une amélioration de la flexibilité cognitive (réduction du temps TMT B-A). Un coefficient β standardisé négatif entre les capacités aérobies et la flexibilité cognitive signifie qu'une amélioration des capacités aérobies (augmentation de la distance au test TM6) est associée à une meilleure flexibilité cognitive (réduction du temps au TMT B-A).* : $p < 0,05$.*

3.6. Prédiction de l'évolution cognitive par modalités (intensités physique et cognitive, plaisir) des programmes

Des régressions multiples ont été réalisées afin de prédire l'évolution des scores cognitifs à partir de trois facteurs : l'intensité physique (objective), l'intensité cognitive (subjective) et le plaisir. L'ensemble des résultats est présenté en Annexe 24. Deux analyses indiquent des modèles significatifs [mémoire visuospatiale à court terme (empan simple), flexibilité cognitive (TMT B-A)]. Les statistiques de colinéarité sont correctes, avec des valeurs de VIF comprises entre 1,073 et 1,187, indiquant l'absence de colinéarité problématique entre les variables indépendantes.

3.6.1. Mémoire visuospatiale à court terme – Empan simple

Le modèle expliquant l'évolution de l'empan simple (Figure 44) est significatif ($F(3, 117) = 4{,}01$, $p = 0{,}009$) et explique 9,54 % de la variance ($R^2 = 0{,}0954$). Le prédicteur intensité cognitive présente un effet positif significatif ($\beta = 0{,}28$, $p = 0{,}003$), suggérant qu'une plus grande intensité cognitive perçue est associée à une amélioration plus marquée de la mémoire visuospatiale à court terme. Ni l'intensité physique, ni le plaisir ne sont significativement associés à l'évolution de la performance cognitive.

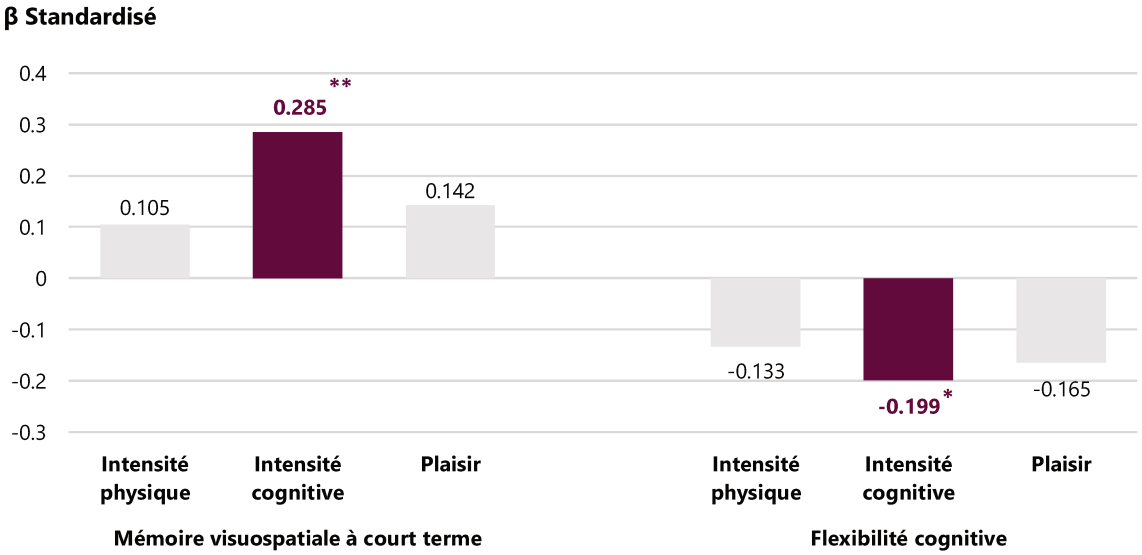


Figure 44. Modèles de régression multiple pour prédire l'évolution de la mémoire visuospatiale à court terme et de la flexibilité cognitive (étude 4)

Note. *Le score de flexibilité cognitive (TMT B-A) est un temps, une diminution du temps représente une amélioration. Ainsi, un coefficient β standardisé négatif entre la flexibilité cognitive et l'intensité cognitive représente une association positive entre une amélioration de la flexibilité cognitive (réduction du temps TMT B-A) et une intensité cognitive plus élevée.* ***** *: p < 0,05,* ****** *: p < 0,01.*

3.6.2. Flexibilité cognitive – TMT B-A

Le modèle expliquant l'évolution du temps au test TMT B-A (Figure 44) est significatif ($F(3, 117) = 3,19$, $p = 0,026$) et explique 7,75 % de la variance ($R^2 = 0,0775$). Un effet négatif significatif est observé pour l'intensité cognitive ($\beta = -0,20$, $p = 0,034$), suggérant que les participants exposés à une stimulation cognitive perçue plus élevée présentent une réduction du coût de flexibilité cognitive, mesurée par le TMT B-A. Ni l'intensité physique, ni le plaisir ne sont significativement associés à l'évolution de la performance.

3.7. Récapitulatif des résultats

Les résultats des ANOVA, contrastes planifiés et post hoc sont récapitulés pour chaque variable dans le Tableau 22 pour les résultats physiques, moteurs, cognitifs, et de DT.

Tableau 22. Récapitulatif des évolutions aux tests physiques, moteurs, cognitifs et de DT entre les pré-tests et les post-tests (étude 4)

Mesures	Effets significatifs (ANOVA)	Contrastes planifiés	Groupes contributifs (post hoc)
Capacités musculaires			
30 s assis-debout	Temps, Groupe, Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC Simultané > Cognitif Incorporé > Additionnel	(↑) AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO (↑) AM2C, EM2I, SWITCH > JV (↑) SWITCH > GC, VÉLO-JV
Handgrip droite	Temps	—	—
Lancer de medicine ball	Temps, Temps×Groupe	Incorporé > Contrôle, Additionnel Naturel > Virtuel	(↑) AM2C, EM2I
Souplesse			
Sit-and-reach	Temps	—	—
Gratte-dos	Temps	—	—
Équilibre			
TUG	Temps, Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC Simultané > Cognitif	(↑) AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV
Coordination			
Test de coordination du bas du corps	Temps, Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC Simultané > Physique, Cognitif Incorporé > Additionnel Naturel > Virtuel	(↑) AM2C, EM2I, SWITCH (↑) AM2C > VÉLO-JV
Capacités aérobies			
TM6	Temps, Temps×Groupe	Incorporé > Contrôle, Additionnel	(↑) EM2I

Tableau 22. Suite

Mesures	Effets significatifs (ANOVA)	Contrastes planifiés	Groupes contributifs (post hoc)
Cognitif			
Temps de réaction			
2 choix	Temps, Temps×Groupe	Incorporé > Additionnel ; Virtuel > Naturel	(↑) EM2I, SWITCH
8 choix	Temps	Incorporé > Additionnel	—
8 choix inhibition	Temps	Incorporé > Additionnel	—
Inhibition			
Score inhibition	Temps, Temps×Groupe	Cognitif > Simultané	(↑) JV
Go/No-Go (temps - moyenne)	—	—	—
Go/No-Go (temps - écart-type)	Temps×Groupe	Cognitif > Simultané	—
Go/No-Go (erreurs)	—	—	—
MVCT et MVDT			
Empan visuospatial simple	Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC	(↑) EM2I
Empan visuospatial inverse	—	—	—
Flexibilité mentale			
TMT B	Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC	(↑) EM2I, (↓) GC
TMT B-A	Temps×Groupe	Simultané, Incorporé > GC	—
Double-tâche			
DTE cognitivo-cognitive			
Go/No-Go (écart-type TR)	Temps	—	—
Tâche cognitive 2	Temps	—	—
DTE cognitivo-motrice			
Tâche cognitive	Temps	—	—
Tâche motrice	Temps×Groupe	Additionnel > Incorporé	—

Note. *Additionnel : entraînement additionnel (VÉLO-JV) ; Cognitif: entraînement cognitif (JV) ; GC : Groupe Contrôle ; Incorporé : entraînement incorporé (AM2C, EM2I, SWITCH) ; Naturel : entraînement simultané naturel (AM2C) ; Physique : entraînement physique (VÉLO) ; Simultané : entraînement simultané (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; TMT : Trail Making Test ; TUG : Timed Up and Go ; TM6 : Test de Marche de 6 minutes ; Virtuel : entraînement simultané virtuel (EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ; ↑ : amélioration significative entre les pré-tests et les post-tests. ↓ : diminution significative entre les pré-tests et les post-tests*

4. DISCUSSION

La manière de combiner et d'intégrer les exigences motrices et cognitives dans l'entraînement physique pour les personnes âgées représente un axe de recherche en plein essor (Fissler et al., 2013 ; Herold et al., 2018 ; Pesce, 2012). Cette étude avait pour objectif principal de déterminer si l'entraînement incorporé générait des effets physiques, moteurs, cognitifs et de DT différenciés de ceux de l'entraînement additionnel auprès de personnes âgées. Elle cherchait également à comparer les effets des différentes modalités de l'entraînement incorporé. Enfin, elle testait en amont l'impact de l'entraînement simultané en comparaison aux entraînements physique et cognitif seuls, ainsi que l'influence de la virtualité sur les effets de l'entraînement simultané.

4.1. Effets des entraînements sur les capacités physiques et motrices

4.1.1. Les effets de l'entraînement simultané par rapport au groupe contrôle

Les résultats de cette étude indiquent un effet de l'entraînement simultané sur la force du bas du corps, l'équilibre dynamique et la coordination. Cela confirme les résultats des méta-analyses de Rieker et al. (2022) et de Teraz et al. (2022) sur la force (Rieker et al., 2022) et sur l'équilibre (Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022). Toutefois, les conclusions de Gavelin et al. (2021) divergent. Bien que leur analyse révèle un effet global sur les capacités physiques, aucune amélioration significative de la force ni de l'équilibre n'est observée en comparaison avec le groupe contrôle. Plusieurs éléments méthodologiques permettent d'expliquer ces divergences. D'abord, l'échantillon analysé par Gavelin et al. (2021) est hétérogène, puisqu'il regroupe à la fois des participants en bonne santé (n = 28) et des personnes présentant un trouble cognitif léger (n = 13), ce qui peut influencer les effets de l'entraînement, en particulier sur l'équilibre. De plus, leur analyse sur cette composante repose uniquement sur 12 études (et 9 pour la force), intégrant des mesures d'équilibres statique et dynamique. De leur côté, Rieker et al. (2022) intègrent 17 études comparant un entraînement combiné à un groupe contrôle. Par ailleurs, leur résultat sur l'équilibre peut également être remis en question puisque la mesure de cette capacité comprend à la fois des évaluations directes de l'équilibre mais également indirectes, via des paramètres de la marche (variabilité de la foulée, longueur du pas). Ainsi, les différences de populations, de nombre d'études considérées, de protocoles d'évaluation et de définitions des variables expliquent potentiellement les divergences observées entre ces méta-analyses. Quant à celle de Teraz et al. (2022), elle repose sur 41 études utilisant le TUG, test de référence pour l'évaluation de l'équilibre dynamique, qui est également employé dans la présente étude, renforçant ainsi la fiabilité et la concordance des résultats obtenus.

Dans la présente étude, il est également observé une amélioration significative de la coordination par l'entraînement simultané. Cependant, aucune méta-analyse n'a, à notre connaissance, examiné les effets de l'entraînement combiné sur cette capacité auprès des personnes âgées. En revanche, c'est le cas de plusieurs études interventionnelles. L'étude d'Oswald et al. (2006) a comparé plusieurs types de programmes, notamment un programme combiné séquentiel d'entraînement cognitif et physique de longue durée (30 semaines, 1 séance hebdomadaire de chaque entraînement). L'entraînement physique (45 minutes) ciblait l'équilibre, la coordination perceptivo-motrice et la flexibilité, tandis que l'entraînement cognitif (90 minutes) portait sur la vitesse de traitement, l'attention et la mémoire. Le protocole et les résultats de cette étude sont détaillés dans la partie 2.4 du chapitre 4 du cadre théorique. À la suite du programme, le groupe combiné a montré une amélioration sur le score composite de condition physique. Celui-ci comprenait une mesure de la coordination, évaluée au moyen du *KTK-test*, un outil reconnu pour évaluer cette dimension, surtout chez les enfants. Cependant, l'effet sur la coordination n'a pas été évalué de manière isolée, rendant impossible l'interprétation des effets spécifiques sur cette fonction. De leur côté, Marmeleira et al. (2009) ont évalué les effets d'un entraînement combiné additionnel de 12 semaines (3 fois par semaine, 60 minutes) mêlant des stimulations physiques, perceptives et cognitives, par rapport à un groupe contrôle. La performance au *Foot Tap Test* s'est significativement améliorée à la suite de l'entraînement. Toutefois, ce test présente des limites méthodologiques importantes pour évaluer la coordination globale : il s'agit d'un mouvement simple, répétitif, sans exigence d'adaptation posturale ni de coordination inter-segmentaire. Il ne reflète donc qu'imparfaitement l'évaluation de la complexité motrice recherchée dans la présente étude.

Plus récemment, deux études de la même équipe de chercheurs (Temprado et al., 2019 ; Torre et al., 2024) ont exploré l'effet d'un programme de marche nordique, un entraînement physique et moteur, à dominante aérobie, mobilisant la coordination bras-jambes[1]. Leur étude de 2024 montre que le programme (3 séances hebdomadaires de 75 minutes pendant 8 semaines) améliore significativement la coordination mesurée par le *Four-Square Stepping Test* (FSST). Leur étude de 2019 compare, quant à elle, un programme de marche nordique à un programme dit multi-composants, spécifiquement conçu pour solliciter différentes formes de coordination (œil-main, multi-membres, orientation spatiale, réactivité, coordination globale). Les deux groupes montrent des améliorations significatives similaires au FSST. Dans ces deux études, les entraînements, spécifique de la coordination (programme multi-

[1] Bien que la stimulation cognitive ne soit pas absente de la marche nordique, celle-ci est faible. De ce fait, nous ne considérons pas ce type de programme comme de l'entraînement combiné.

composants) ou plutôt global (marche nordique) permettent tous les deux d'améliorer la coordination de manière similaire. Ceci est reflété dans la présente étude par l'amélioration équivalente des trois groupes mobilisant la coordination de manière importante pour AM2C et EM2I et dans une moindre mesure pour SWITCH. Toutefois, les deux études citées (Temprado et al., 2019 ; Torre et al., 2024) ne comportent pas de groupe contrôle, limitant l'interprétation causale des résultats. De plus, le test FSST peut présenter un effet plafond susceptible d'apparaître rapidement, ce qui peut masquer des différences d'efficacité entre interventions.

Ainsi, bien que les données issues d'études interventionnelles suggèrent un effet positif de certains entraînements combinés (Marmeleira et al. 2009 ; Oswald et al., 2006) et d'activités physiques (Temprado et al., 2019 ; Torre et al., 2024) sur la coordination, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, étant donné les limites méthodologiques présentées. Face aux limites des tests (décrites plus en détail dans la partie 2.1.1 du chapitre 3 du cadre théorique), reflétant un manque de mesures valides pour évaluer les effets d'entraînement sur la coordination auprès des personnes âgées (Rosado et al., 2025), un nouveau test (test de coordination du bas du corps) a été développé spécifiquement pour cette étude. Il n'a pas fait l'objet d'un examen de validation préalable à son intégration au protocole, constituant une limite méthodologique soulevant des questions quant à la fidélité et la validité du construit évalué (i.e., coordination). En effet, sans données normatives et analyse de validité convergente, il n'est pas possible de garantir que le test évalue bien la coordination motrice de manière fiable et reproductible. Néanmoins, les résultats obtenus dans cette étude indiquent que ce test présente une bonne sensibilité aux effets de l'intervention, sans effet d'apprentissage en test-retest (contrôlé ici), ce qui en fait un outil potentiellement pertinent pour la détection de changements à court terme. Il apparaît donc comme un outil prometteur, à condition que des travaux futurs en valident les qualités psychométriques (i.e., validité, fidélité).

Les résultats indiquent que l'entraînement simultané ne permet pas d'améliorer la souplesse, bien que les recommandations d'entraînement de cette capacité aient été majoritairement respectées (exercices de 10 à 30 secondes, avec 3 à 4 répétitions par groupe musculaire). Cela peut s'expliquer par un volume d'entraînement insuffisant, les exercices comprenant généralement seulement deux répétitions par muscle. Les capacités aérobies et la force du haut du corps se sont améliorées uniquement pour une forme d'entraînement simultané, à savoir l'entraînement incorporé. Les résultats sont discutés dans la partie 4.1.3.

4.1.2. Les effets de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements cognitif et physique

Les effets de l'entraînement simultané sur l'équilibre, la force du bas du corps et la coordination observés par rapport au groupe contrôle surpassent également ceux de l'entraînement cognitif, avec des tailles d'effet allant de modérées (équilibre, coordination) à élevées (force du bas du corps). Gavelin et al. (2021) ont également montré que l'entraînement simultané était plus efficace que l'entraînement cognitif pour améliorer les capacités physiques, mais Rieker et al. (2022) n'ont pas retrouvé cet effet spécifique sur l'équilibre. Les bénéfices démontrés dans la présente étude semblent, par ailleurs, supérieurs à ceux décrits dans les travaux précédents (Gavelin et al., 2021 ; Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022). Lorsqu'ils sont comparés à l'entraînement physique, les effets de l'entraînement simultané montrent un effet supérieur pour la coordination et une tendance à la supériorité pour l'équilibre (p = 0,06), rejoignant les résultats de Teraz (2022), Rieker (2022) et leurs collaborateurs. Ces effets supérieurs sur la coordination et l'équilibre pourraient s'expliquer par la richesse des sollicitations motrices dans certains groupes simultanés, notamment EM2I et AM2C, hypothèse explicative avancée par l'équipe de Temprado (Temprado et al., 2019 ; Torre et al., 2024) pour interpréter l'amélioration de la coordination dans leurs études évaluant les effets de la marche nordique et d'un programme multi-composants (décrits dans la section ci-dessus). De plus, la stimulation cognitive des entraînements simultanés peut être bénéfique pour ces deux capacités. En effet, il a, par exemple, été démontré un lien entre les capacités exécutives et celles d'équilibre (Divandari et al., 2024). Ainsi, les effets supérieurs observés dans certains groupes d'entraînement simultané pourraient résulter d'une synergie entre des sollicitations physiques et motrices variées et la stimulation cognitive.

4.1.3. Les effets de l'entraînement incorporé par rapport à l'entraînement additionnel

L'équilibre est la seule capacité physique à s'être améliorée de manière comparable entre les entraînements incorporés et additionnels. En effet, tous les groupes ayant suivi un entraînement simultané (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) ont présenté des améliorations de l'équilibre entre les pré-tests et les post-tests, avec des tailles d'effet allant de modérées (VÉLO-JV, AM2C) à élevées (EM2I, SWITCH). Ces résultats confirment les conclusions de la méta-analyse de Teraz et al. (2022), indiquant un effet comparable des entraînements incorporé et additionnel sur l'équilibre. L'amélioration observée uniquement dans le groupe VÉLO-JV, et non dans les groupes VÉLO ou JV pris séparément, permet de tirer deux conclusions. Premièrement, il n'est pas toujours nécessaire de cibler directement l'équilibre pour en améliorer les performances, remettant en question le principe de spécificité de l'entraînement

sur cette fonction. Deuxièmement, cela suggère que la combinaison d'une stimulation physique et cognitive est, au moins en partie, responsable de l'amélioration de l'équilibre.

Cette étude apporte également des résultats nouveaux concernant d'autres capacités physiques. Tous les entraînements simultanés ne sont pas efficaces pour améliorer la force du haut du corps ni les capacités aérobies. Seuls l'entraînement incorporé conduit à des améliorations significatives dans ces domaines comparativement au groupe contrôle ainsi qu'à l'entraînement additionnel, avec toutefois des tailles d'effet faible (lancer de medicine ball) à modérée (TM6). Plus précisément, les groupes AM2C et EM2I améliorent la force du haut du corps, tandis que seul EM2I progresse pour les capacités aérobies.

Concernant la force du haut du corps, l'absence d'effet pour le groupe additionnel (VÉLO-JV) et le groupe SWITCH peut s'expliquer par la faible sollicitation (SWITCH), voire l'absence totale de travail (VÉLO-JV) de cette composante dans leurs entraînements respectifs. Cela fait référence au principe de surcharge : pour produire une adaptation à l'entraînement, un stress supérieur à la normale sur le corps est nécessaire. En outre, la force du haut du corps a été évaluée à l'aide de deux tests : le test de *handgrip* et le lancer de medicine ball. Or, seule la performance au lancer de medicine ball s'est améliorée de manière significative, chez les groupes EM2I et AM2C. Les conditions de ce test peuvent être considérées comme proches des habiletés motrices mobilisées durant les entraînements EM2I et AM2C, dans lesquels des exercices avec des balles étaient régulièrement proposés. Cela fait référence à la dimension spécificité-généralité de la compétence acquise de Barnett et Ceci (2002). La force musculaire du haut du corps a majoritairement été développée avec l'utilisation de ballons, impliquant donc une compétence spécifique. Ainsi, le transfert de la force du haut du corps se traduit uniquement par une situation de lancer de ballon, et non par une situation statique. Sur cette dimension, le transfert peut donc être caractérisé de proche. En revanche, les contextes du transfert, et notamment les contextes physique et social diffèrent entre les tâches d'entraînement et d'évaluation.

Concernant les capacités aérobies, la différence d'intensité entre les entraînements peut expliquer les effets supérieurs de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel. Alors que l'intensité moyenne des entraînements simultanés est globalement modérée, les groupes incorporés atteignent des pics d'intensité significativement plus élevés (entre 69,09 % et 74,15 % de la FCR) que le groupe additionnel (56,23 % de la FCR). Cette structuration intermittente de l'effort, proche d'un entraînement HIIT, contraste avec la sollicitation modérée et continue de l'entraînement additionnel. Pourtant, une méta-analyse récente (G. Stern et al., 2023) suggère que le HIIT n'est pas systématiquement plus efficace qu'un entraînement modéré continu pour améliorer la performance au TM6 (test également utilisé dans la présente étude) chez les personnes âgées. Mekari et al. (2020) montre

également des effets similaires des entraînements (3 séances par semaine pendant 8 semaines) en HIIT et continue sur la VO_2max. Néanmoins, d'autres études rapportent un avantage du HIIT sur les capacités aérobies (Keating et al., 2020). En outre, malgré une intensité maximale comparable entre les trois groupes incorporés (i.e., EM2I, AM2C, SWITCH), seul EM2I présente une amélioration significative des capacités aérobies. Cela suggère la présence probable d'autres facteurs contributifs. L'un d'entre eux pourrait être le niveau de départ des participants. Bien qu'aucune différence significative ne soit observée entre les groupes en pré-tests, les participants des groupes EM2I et SWITCH présentaient des performances initiales plus faibles (553,37 mètres pour EM2I, 602,34 mètres pour AM2C et 553,98 mètres pour SWITCH). Cela laisse supposer une marge d'évolution plus importante, faisant référence au principe des valeurs initiales, indiquant que l'amélioration attendue sera plus importante chez les individus ayant des niveaux de départ plus faibles. Un autre facteur contributif pourrait également concerner le fait que les programmes EM2I et AM2C généraient de nombreux déplacements dans l'espace qui étaient plus limités pour le programme SWITCH. Ainsi, l'accumulation d'un plus faible niveau de départ (bien que non significatif) couplé à une sollicitation des capacités de marche à une intensité modérée à élevée peut expliquer l'amélioration unique du groupe EM2I.

Enfin, les effets de l'entraînement incorporé apparaissent supérieurs à ceux de l'entraînement additionnel en ce qui concerne la force du bas du corps et la coordination. S'agissant de la force du bas du corps, des améliorations significatives sont observées dans les trois groupes incorporés, ainsi que dans le groupe d'entraînement physique (VÉLO). Ce dernier partage pourtant une sollicitation physique identique à celle du groupe additionnel (pédalage sur vélo stationnaire). Ces résultats suggèrent que l'ajout d'une tâche cognitive sous une forme additionnelle (VÉLO-JV) peut, dans certains cas, interférer avec les bénéfices attendus sur certaines capacités physiques, en l'occurrence la force du bas du corps. En effet, la distance moyenne parcourue par le groupe VÉLO est significativement supérieure à celle du groupe VÉLO-JV, mettant en lumière la perturbation de l'ajout de la tâche cognitive sur la réalisation de la tâche physique et expliquant partiellement la différence d'effets. En outre, les effets retrouvés sur les entraînements incorporés et le groupe VÉLO confirment qu'un entraînement de renforcement musculaire spécifique n'est pas nécessairement requis pour induire des gains de force au niveau des membres inférieurs. Pour la coordination, tous les groupes incorporés montrent des améliorations significatives, renforçant l'idée que les formats d'entraînement cognitivo-moteurs et multi-domaine (type EM2I, SWITCH, AM2C) sont plus adaptés que les formats cognitivo-physiques additionnels pour améliorer les habiletés complexes telles que la coordination.

Les résultats sur les capacités physiques et motrices sont en accord avec les recommandations, telles que celles de l'ACSM, indiquant que l'entraînement intégrant plusieurs modalités, notamment aérobie, renforcement musculaire, équilibre, habiletés motrices complexes, et souplesse (comme c'est le cas pour EM2I et AM2C), génère des bénéfices sur un large éventail de capacités physiques et motrices. Ils pourraient aussi produire des effets cumulatifs et complémentaires, en raison de la diversité des stimulations qu'ils impliquent (Ferketich et al., 1998 ; Nelson et al., 2007 ; Wood et al., 2001).

4.2. Effets des entraînements sur les capacités cognitives

4.2.1. Les effets de l'entraînement simultané par rapport au groupe contrôle

L'entraînement simultané permet d'améliorer significativement la Mémoire Visuospatiale à Court Terme (MVCT) et la flexibilité cognitive, comparativement au groupe contrôle, avec des tailles d'effet allant de faibles à modérées. Ces résultats sont en accord avec la méta-analyse de Zhu et al. (2016) et de Rieker et al. (2022) rapportant un effet de l'entraînement combiné sur la mémoire et les fonctions exécutives.

Trois facteurs principaux peuvent expliquer ces effets : la stimulation physique et motrice, la stimulation cognitive et/ou la combinaison des deux. D'un point de vue physiologique, l'effort aérobie peut induire plusieurs adaptations neurocardiovasculaires, notamment une angiogenèse dans les régions frontales et une neurogenèse dans l'hippocampe (Erickson et al., 2011), conduisant à une amélioration des performances cognitives (Audiffren et al., 2011). De plus, l'exposition à de nouvelles tâches sensori-motrices peut favoriser la synaptogenèse (Kempermann et al., 2010 ; Voelcker-Rehage & Niemann, 2013). Toutefois, aucune mesure neurophysiologique n'ayant été réalisée dans cette étude, ces hypothèses ne peuvent être confirmées. Dans la présente étude, la MVCT et la flexibilité cognitive se sont toutes deux améliorées après l'entraînement simultané. Cependant, seule l'amélioration de la flexibilité cognitive est prédite par les gains en capacités aérobies et en coordination. Cela suggère des mécanismes distincts entre l'amélioration de la MVCT et celle de la flexibilité cognitive. En effet, les fonctions exécutives, et notamment la flexibilité cognitive, sont fortement sollicitées lors d'activités motrices complexes (Netz, 2019) et sont connues pour leur sensibilité à l'activité physique (Colcombe & Kramer, 2003). En revanche, l'amélioration de la MVCT pourrait relever d'un effet plus global de la stimulation combinée, sans que l'évolution physique ou motrice ne la prédise spécifiquement. En effet, la mémoire visuospatiale mobilise davantage les régions pariéto-occipitales et hippocampiques, qui peuvent avoir une relation moins prononcée entre l'amélioration physique et le gain cognitif que les fonctions exécutives, surtout sur un protocole de courte durée. Enfin, l'intensité cognitive perçue prédit

de manière significative l'amélioration des deux capacités, avec un effet légèrement plus marqué sur la MVCT (β = 0,285) que sur la flexibilité cognitive (β = -0,199, où un score plus faible indique une amélioration). Ces résultats suggèrent que l'engagement cognitif durant les séances constitue un facteur participatif aux bénéfices cognitifs observés, et ce, de manière plus prononcée pour la MVCT.

L'amélioration de la MVCT et de la flexibilité cognitive peut être mise en perspective de nos précédents travaux (Béraud-Peigné et al., 2022, 2024). Nous avons précédemment comparé les effets de l'entraînement AM2C à un groupe contrôle (Béraud-Peigné et al., 2022), et ceux de l'entraînement EM2I à un entraînement physique (marche, renforcement musculaire) (Béraud-Peigné et al., 2024), dans des contextes similaires (2 séances d'1 h pendant 12 semaines), et en utilisant les mêmes outils d'évaluation de la MVCT et de la flexibilité cognitive que dans la présente étude. L'amélioration de la MVCT observée avec l'entraînement simultané dans la présente étude confirme nos précédents résultats pour les programmes EM2I et AM2C. Toutefois, ici, l'effet est retrouvé de manière globale pour l'entraînement simultané (et incorporé) par rapport au groupe contrôle, ainsi que spécifiquement au groupe EM2I, mais non à AM2C. En revanche, l'amélioration de la flexibilité cognitive observée avec l'entraînement simultané, et plus particulièrement avec le programme EM2I, contraste avec nos résultats antérieurs sur ce même programme, où aucun effet significatif n'avait été mis en évidence. Dans cette précédente étude, un effet d'interaction *temps*groupe* avec une tendance significative avait toutefois été relevé (p = 0,07 pour le *TMT B* et p = 0,06 pour le *TMT B-A*). Le fait que cette comparaison ait été réalisée face à un groupe contrôle actif pourrait avoir masqué l'amélioration réelle du groupe EM2I par rapport à un contrôle totalement passif.

Deux fonctions exécutives n'ont pas été améliorées par l'entraînement simultané : l'inhibition et la mémoire visuospatiale de travail. Ces résultats ne sont que partiellement en accord avec les travaux de Wollesen et al. (2020), seule méta-analyse à ce jour à examiner l'effet de l'entraînement combiné sur des fonctions exécutives précises. Comparativement à des groupes témoins inactifs, elle ne met en évidence aucun effet significatif sur la mémoire de travail, la flexibilité cognitive et l'inhibition. Toutefois, cette méta-analyse présente plusieurs limites : bien qu'elle inclue 50 ECR, seuls deux examinent la mémoire de travail, quatre l'inhibition, et un la flexibilité cognitive, ce qui limite la portée des conclusions. Par ailleurs, plusieurs facteurs peuvent expliquer l'absence d'effet observée dans la présente étude. Concernant l'inhibition, Wollesen et al. (2020) soutiennent que la majorité des programmes montrant des bénéfices sur cette fonction comprenaient un entraînement spécifique de celle-ci, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude. De plus, bien que le Go/No-Go soit un test référant dans ce domaine et que de fortes corrélations aient été démontrées en étude 1 entre le score d'inhibition DLI et celui du test

de Stroop chez les personnes âgées, il aurait été pertinent d'inclure le test de Stroop afin de confirmer les bénéfices de l'entraînement EM2I, mais non ceux d'AM2C, retrouvés avec ce test dans nos précédents travaux (Béraud-Peigné et al., 2022, 2024). Concernant la MVDT, nous avons déjà précédemment montré des effets de l'entraînement simultané, notamment EM2I en comparaison à un groupe d'entraînement physique (Béraud-Peigné et al., 2024), mais nous n'avons pas constaté d'effet du programme AM2C en comparaison à un groupe contrôle (Béraud-Peigné et al., 2022). La MVDT était pourtant évaluée, tout comme dans la présente étude par le test de Corsi. Cependant, ici, les scores à l'empan visuospatial inverse sont plus élevés (moyenne de 4,53 en pré-tests pour le groupe EM2I dans l'étude de 2024, contre 6,36 dans cette étude). Le niveau de départ des participants était potentiellement trop haut, ou alors le test n'avait pas la sensibilité adéquate pour mettre en évidence de faibles différences d'effets, étant donné que la méthode de notation est un score.

4.2.2. Les effets de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements physique et cognitif

Concernant les deux capacités cognitives significativement améliorées par l'entraînement simultané, à savoir la MVCT et la flexibilité cognitive, les résultats ne montrent pas d'effet supérieur de l'entraînement simultané par rapport à l'entraînement physique. Ces résultats rejoignent les conclusions de la méta-analyse de Zhu et al. (2016), qui ne rapportent pas de bénéfices cognitifs supplémentaires de l'entraînement combiné sur ces fonctions. Ils contrastent toutefois avec les résultats de Rieker et al. (2022) qui mettent en évidence un avantage significatif de l'entraînement combiné sur les fonctions exécutives et la mémoire[1], comparativement à l'entraînement physique. L'hétérogénéité de ces résultats peut s'expliquer par deux raisons. Les études comparant l'entraînement combiné à l'activité physique ou à l'entraînement cognitif proposent parfois des entraînements plus longs pour l'entraînement combiné (e.g., Fabre et al., 2002 ; Oswald et al., 2006). De plus, de nombreuses études n'incluent pas de groupe contrôle inactif, ce qui empêche de contrôler les effets test-retest et limite l'interprétation des gains observés (e.g., Eggenberger et al., 2015 ; Pellegrini-Laplagne et al., 2022 ; Rahe et al., 2015). Ces limites peuvent ainsi surestimer les effets de l'entraînement combiné et expliquer la raison pour laquelle des effets supérieurs sont parfois retrouvés par rapport à l'entraînement physique ou cognitif. Dans la présente étude, l'ensemble des groupes a bénéficié d'une durée et d'une fréquence d'entraînement semblables. De plus, aucun effet supérieur de l'entraînement simultané n'est observé par rapport à

[1] Mesure incluant la mémoire à court terme et à long terme, tout comme Zhu et al. (2016).

l'entraînement cognitif, ce qui concorde avec la majorité des méta-analyses ayant comparé ces deux modalités (Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Zhu et al., 2016).

Ainsi, les résultats de cette étude ne corroborent pas la théorie de la facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013) selon laquelle la combinaison de stimulations physiques et cognitives devrait produire des effets cognitifs synergiques, c'est-à-dire supérieurs à ceux générés par chaque modalité isolée. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette absence d'effet supérieur. Tout d'abord, bien que l'intensité physique ait été jugée suffisante (modérée à élevée, favorisant ainsi l'émergence des mécanismes neurophysiologiques à l'origine des bénéfices cognitifs), la charge cognitive intégrée dans les entraînements pourrait ne pas avoir été suffisamment élevée pour activer pleinement les mécanismes de plasticité cérébrale. Fissler et al. (2013) insistent sur l'importance d'un niveau de difficulté cognitive suffisamment exigeant pour induire des adaptations structurelles et fonctionnelles. Néanmoins, les recherches concernant l'évaluation de la charge cognitive en sont encore à leurs prémices (Manser et al., 2024, 2025). À ce titre, la fNIRS représenterait un outil prometteur. Cette méthode non invasive permet de mesurer, en temps réel, l'activation corticale en enregistrant les variations d'oxygénation sanguine cérébrale. Son principal avantage réside dans sa portabilité, permettant une utilisation en mouvement, y compris lors d'un entraînement simultané. Elle offre ainsi une estimation continue et sensible de la charge cognitive réellement mobilisée pendant l'effort. Toutefois, la fNIRS présente également plusieurs limites, notamment un coût élevé, une sensibilité au bruit de mouvement et une restriction de la mesure aux régions corticales superficielles. Une section de la partie 3.1 de la discussion générale est consacrée à la question de l'évaluation de la charge cognitive.

Dans la présente étude, seule une évaluation subjective de l'intensité cognitive est réalisée, à l'aide d'une échelle de cotation sur 10 points. L'intensité cognitive perçue se situe entre 3,70 et 4,89 pour les entraînements simultané et cognitif, avec des valeurs plus élevées dans le groupe cognitif que simultané. Ces données suggèrent que bien que les tâches proposées aient été riches, progressives et exigeantes, la double charge induite par la combinaison simultanée pourrait avoir limité leur efficacité. Il est donc possible que l'interférence physique ait entravé l'effet attendu de la stimulation cognitive. Il est également envisageable que certaines tâches aient été perçues comme trop complexes, induisant une surcharge cognitive susceptible d'entraver les effets cognitifs. Dans cette perspective, il est retrouvé un lien négatif entre l'intensité physique (moyenne et maximale) et l'intensité cognitive. Cela peut être interprété à la lumière des modèles théoriques classiques de la DT, en particulier le modèle de partage de capacité (Kahneman, 1973) et le modèle du goulet d'étranglement (Pashler, 1994). Ces deux approches s'accordent sur un point central : les ressources attentionnelles et exécutives sont limitées, et

lorsqu'un individu est confronté à deux tâches qu'il doit réaliser simultanément, ses ressources doivent être partagées entre les deux traitements. Le modèle de partage de capacité postule une répartition flexible mais contrainte des ressources attentionnelles. Ainsi, une augmentation de l'intensité physique, notamment dans des tâches exigeantes sur le plan moteur, peut mobiliser une proportion plus importante de ces ressources, réduisant alors la capacité disponible pour le traitement cognitif. Le modèle du goulet d'étranglement (Pashler, 1994), de son côté, insiste davantage sur des contraintes sérielles de traitement : certaines étapes cognitives ne peuvent être exécutées en parallèle, et doivent donc être temporairement suspendues lorsqu'une autre tâche occupe les mêmes circuits de traitement. Autrement dit, même si la réalisation des deux tâches simultanées est maintenue, certaines étapes du traitement peuvent être bloquées ou retardées. Ces mécanismes théoriques offrent une lecture possible du lien négatif observé : dans les situations combinées, l'augmentation de l'intensité physique pourrait entraîner un désengagement partiel de la composante cognitive, les ressources étant prioritairement mobilisées pour l'exécution physique, se traduisant par une diminution de l'intensité cognitive. Si cela a souvent été discuté dans des paradigmes de DT additionnelle, ce résultat est plus surprenant dans le cas des tâches incorporées (e.g., AM2C, EM2I, SWITCH), dans lesquelles les dimensions physiques et cognitives sont censées être intégrées dans une seule et même tâche. Ces résultats suggèrent toutefois que même dans ces formats d'entraînement incorporé, les participants pourraient ajuster leur niveau d'engagement selon l'intensité dans l'une ou l'autre des dimensions. Ainsi, l'incorporation des tâches ne garantirait pas un engagement équilibré des ressources : lorsque la tâche motrice est exigeante, les ressources cognitives peuvent être reléguées au second plan, et inversement. Cela est cohérent avec la stratégie « *Posture First* » (Shumway-Cook & Woollacott, 2000). En somme, la corrélation négative entre intensité physique et intensité cognitive pourrait refléter un arbitrage adaptatif des ressources attentionnelles en fonction de l'intensité de chacune des tâches. Cependant, de nouvelles analyses sont nécessaires étant donné que les corrélations sont générales (les corrélations ont été faites sur l'ensemble des 6 groupes actifs). Des analyses par catégorie (uniquement incorporée et uniquement additionnelle) guideraient ces propos.

Ce résultat met en lumière la nécessité d'un ajustement fin de la charge cognitive et physique dans les programmes d'entraînement simultané, afin d'éviter un déséquilibre pouvant limiter les bénéfices attendus sur l'une ou l'autre dimension. Par ailleurs, l'intensité cognitive n'a été évaluée qu'à l'aide d'une échelle de Likert, méthode non validée pour évaluer ce construit. Il est possible que les participants aient évalué plutôt la difficulté globale de la séance que spécifiquement l'intensité cognitive.

Cela souligne l'importance de développer et de valider une échelle d'évaluation cognitive subjective[1] et d'utiliser des mesures objectives (comme cela a été explicité précédemment).

L'absence de lien direct entre les tâches cognitives intégrées dans l'entraînement et les fonctions évaluées peut également expliquer le manque de transfert. Selon la logique du transfert spécifique, l'entraînement doit mobiliser de manière répétée les mêmes fonctions que celles évaluées pour induire une amélioration mesurable (Karbach & Verhaeghen, 2014). Ainsi, si les tâches proposées sollicitaient peu la MVCT ou la flexibilité cognitive, des gains limités apparaissent cohérents. Bien qu'il soit supposé que les entraînements simultanés stimulent ces fonctions, elles le sont de manière non spécifique et possiblement de manière pas assez répétée ou intense. Des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer les fonctions cognitives spécifiquement ciblées par ce type d'entraînement et la charge cognitive associée.

4.2.3. Les effets de l'entraînement cognitif via les jeux vidéo

L'entraînement cognitif mené à travers les JV semble améliorer spécifiquement l'inhibition, comme en témoignent la diminution de la variabilité (écart-type) du temps de réaction au test Go/No-Go et l'amélioration du score d'inhibition mesuré avec le dispositif DLI. Ce résultat est encourageant puisqu'il confirme la possibilité d'un transfert relativement éloigné par les JV, alors que ce type de transfert est souvent remis en question dans le cadre d'entraînement cognitif classique (Noack et al., 2009 ; Papp et al., 2009). Par ailleurs, ce résultat contredit les deux méta-analyses évaluant les effets des JV auprès des personnes âgées. Toril et al. (2014) indiquent que les JV (sédentaires de tout type) n'ont pas d'effet sur les fonctions exécutives, résultats confirmés par Mansor et al. (2014), notamment sur l'inhibition (leur travail intègre des jeux vidéo sédentaires et des exergames). Comme supposé et détaillé dans le cadre théorique (partie 3.2.2 du chapitre 3), il est possible que les différents jeux produisent des effets cognitifs distincts.

Dans cette étude, deux JV d'action (*Mario Kart 8 Deluxe*, *New Super Mario Bros. U Deluxe*) ont été utilisés. Ce type de jeux sollicite des processus cognitifs complexes, potentiellement plus favorables à des transferts éloignés que les jeux d'entraînement cérébraux (Perrot et al. (2019), étude détaillée dans la partie 3.2.2 du chapitre 3). Toutefois, les effets spécifiques de ces deux jeux auprès de personnes âgées sont contrastés dans la littérature. Perrot et al. (2019) ont montré qu'un entraînement avec *Mario Bros*

[1] Le NASA-TLX évalue la charge de travail et non spécifiquement l'intensité cognitive.

(3 séances d'1 h pendant 8 semaines) améliorait le raisonnement, la vitesse de traitement, la mémoire spatiale et les fonctions visuospatiales, mais non l'inhibition, tandis que Boot et al. (2013) n'ont observé aucun effet d'un entraînement avec *Mario Kart* (3 séances d'1 h 30 - 2 h pendant 12 semaines) chez des participants légèrement plus âgés. Dans le cadre de la présente étude, l'entraînement a été réparti équitablement entre les deux jeux (12 séances chacun) et n'a permis d'améliorer que l'inhibition, sans effet sur la mémoire visuospatiale, la flexibilité cognitive ou le temps de réaction. Ces résultats, par rapport à ceux de Boot et al. (2013) et Perrot et al. (2019) suggèrent que le jeu *Mario Kart* pourrait ne pas être efficace sur la cognition, contrairement à *New Super Mario Bros. U Deluxe*, et que les participants n'ont peut-être pas bénéficié d'un volume suffisant sur le jeu le plus propice aux gains cognitifs. Pourtant, les deux jeux proposent un environnement riche, avec une évolution graduelle de la difficulté. Pour *Mario Kart 8 Deluxe*, elle est modulée par le choix de la vitesse et/ou des options d'assistance et pour *New Super Mario Bros. U Deluxe*, par le choix de personnages avec des modes simplifiés et par des niveaux de plus en plus complexes. Par ailleurs, les mécanismes internes de jeu diffèrent. *New Super Mario Bros. U Deluxe* induit de nombreuses répétitions, contraignant les joueurs à recommencer les niveaux en cas d'échec, favorisant une amélioration progressive par la répétition, bien qu'il puisse générer de la frustration. À l'inverse, *Mario Kart 8 Deluxe* permet aux joueurs de terminer chaque course, quel que soit leur niveau de performance, réduisant la nécessité de mettre en place des stratégies pour réussir pendant le jeu. Enfin, le volume d'entraînement sur *New Super Mario Bros. U Deluxe* (seulement 50 % des séances) peut avoir été insuffisant pour générer des effets robustes sur l'ensemble des fonctions cognitives évaluées. L'effet positif observé uniquement sur l'inhibition peut s'expliquer par la sollicitation spécifique ou importante de cette fonction dans les jeux utilisés. Ces éléments suggèrent que pour optimiser les effets cognitifs des entraînements via des JV d'action chez les personnes âgées, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du jeu utilisé afin de favoriser la stimulation effective des fonctions cognitives ciblées.

4.2.4. Les effets de l'entraînement cognitif via les jeux vidéo par rapport à l'entraînement simultané

L'entraînement cognitif basé sur les jeux vidéo se révèle plus efficace que l'entraînement simultané sur l'inhibition. Ce résultat suggère que l'entraînement simultané, en particulier sous une forme additionnelle, peut générer des effets d'interférence vis-à-vis des bénéfices de l'entraînement cognitif, notamment en ce qui concerne l'évolution de l'inhibition[1]. En effet, les jeux utilisés et leur

[1] Une hypothèse similaire a été formulée à propos de la force musculaire du bas du corps (voir partie 4.1.3 de la discussion).

répartition sont identiques pour les groupes JV et VÉLO-JV (ce qui n'est pas le cas des programmes AM2C, EM2I et SWITCH), pourtant seule l'amélioration du groupe JV est significative. Il est donc possible que l'ajout d'une tâche physique (pédaler sur un vélo stationnaire), qui plus est non liée à la tâche cognitive, perturbe l'engagement cognitif ou l'efficacité de réalisation du jeu. L'entraînement additionnel peut perturber la réalisation d'une des deux tâches en forçant les participants, soit à partager leurs ressources cognitives entre les deux tâches, soit, s'ils n'en sont pas capables, à en prioriser une ou à basculer rapidement de l'une à l'autre (Al-Yahya et al., 2011 ; Holtzer et al., 2006). Cependant, cette difficulté, notamment cognitive, n'est pas perçue par les participants : aucune différence significative n'est observée entre les deux groupes (VÉLO et VÉLO-JV) concernant l'intensité cognitive subjective. Pour compléter cette analyse, il aurait été utile d'évaluer la progression effective dans les jeux [comme cela a par exemple été effectué dans l'étude de Maillot et al. (2012)] afin de déterminer si l'absence d'effet dans le groupe VÉLO-JV pourrait être liée à une difficulté à progresser dans les jeux.

4.2.5. Les effets de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel

Lorsqu'il est comparé à l'entraînement additionnel, l'entraînement incorporé montre une amélioration significative de plusieurs mesures du temps de réaction, avec notamment une taille d'effet modérée pour le temps de réaction à 2 choix (forme la plus simple des temps de réaction). Toutefois, il est important de souligner que la comparaison entre l'entraînement incorporé et le groupe contrôle ne révèle pas d'effet significatif, à l'exception du temps de réaction à 8 choix avec inhibition, pour lequel une amélioration significative est observée. Ce résultat paradoxal peut s'expliquer par deux facteurs principaux. D'une part, le groupe AM2C (i.e., entraînement incorporé) montre peu de progression, voire une légère régression sur le temps de réaction à 2 choix, ce qui atténue les effets globaux observés pour l'entraînement incorporé. D'autre part, le groupe contrôle présente une légère amélioration sur cette même variable, ce qui tend à réduire l'écart entre les groupes et diminue la significativité des contrastes. En examinant les effets au niveau des groupes, seuls les entraînements EM2I et SWITCH, deux entraînements incorporés utilisant des exergames, montrent une amélioration significative de leurs performances au test de temps de réaction à 2 choix. Ces effets semblent donc spécifiques aux programmes basés sur les exergames incorporés, ce qui souligne leur intérêt.

Aucune différence significative n'est observée entre les entraînements incorporé et additionnel concernant la MVCT et la flexibilité cognitive, bien que ces deux capacités se soient améliorées dans les groupes d'entraînement simultané. Cette absence de différence entre les deux modalités pourrait être liée à une hétérogénéité d'efficacité au sein des entraînements incorporés : seul EM2I présente une amélioration significative sur la flexibilité cognitive. Ainsi, les résultats suggèrent que l'entraînement

incorporé n'est pas globalement supérieur à l'additionnel pour l'ensemble des fonctions cognitives testées (hormis le temps de réaction), comme l'indiquent Eggenberger et al. (2015). Les effets observés semblent davantage liés au contenu spécifique des séances d'entraînement incorporé, notamment à l'environnement interactif des exergames et la complexité motrice mobilisée, plutôt qu'à la seule modalité d'intégration cognitive (incorporée vs additionnelle). Ce constat nuance l'hypothèse théorique d'Herold et al. (2018) qui postulait d'une supériorité générale de l'entraînement incorporé.

Des contrastes planifiés ont été utilisés pour comparer spécifiquement les modalités d'entraînement. Toutefois, la comparaison repose ici sur un déséquilibre entre les groupes, avec trois programmes incorporés (n = 62) contre un seul programme additionnel (n = 22). Ce déséquilibre ne remet pas en cause la validité statistique des contrastes[1] mais limite la représentativité de la modalité « additionnelle ». En effet, il est possible que les effets observés soient en partie spécifiques à ce format unique (VÉLO-JV), et non généralisables à d'autres formes d'entraînement additionnel. Il serait donc pertinent, dans de futures études, d'inclure plusieurs entraînements additionnels, afin de permettre une comparaison plus équitable et de mieux estimer l'effet de cette modalité.

Les effets observés sur les capacités cognitives, mais également sur les capacités physiques et motrices, peuvent s'expliquer par les caractéristiques de la population étudiée. Les participants sont en bonne santé, autonomes, avec un niveau d'éducation élevé. De ce fait, leur niveau physique et cognitif initial est bon (comme démontré par exemple sur les tests 30 secondes assis-debout, TMT et Corsi), rendant leurs marges de progression faibles. La durée des entraînements pourrait également avoir limité l'apparition d'effets. En effet, bien que la durée totale des programmes, des séances ou leur fréquence ne semblent pas moduler les effets cognitifs de l'entraînement combiné (Gheysen et al., 2018) et que des volumes d'entraînement élevés [(Zhu et al., 2016) pour l'entraînement combiné, Colcombe et Kramer (2003) pour l'entraînement physique)] ne soient pas systématiquement plus efficaces que des volumes plus faibles, le protocole utilisé ici, à la recherche de faibles différences entre certains groupes, pourrait nécessiter des doses plus importantes. Par ailleurs, certains tests, notamment le TMT, dont la performance est mesurée avec un temps, pourraient être plus sensibles pour montrer des différences entre les groupes. De plus, certaines fonctions cognitives, notamment la MVCT, ont pu être davantage sollicitées par certains entraînements que d'autres fonctions cognitives, notamment la MVDT.

[1] Ils restent valides même si le design est déséquilibré, à condition que les contrastes soient pondérés, comme c'est le cas dans cette étude

4.3. Effets des entraînements sur les capacités de double-tâche

4.3.1. Double-tâche cognitivo-motrice

Les résultats montrent une amélioration significative des performances en ST motrice pour les groupes ayant suivi un entraînement simultané, en particulier sous format incorporé, comparativement au groupe contrôle, à l'entraînement physique et à l'entraînement cognitif. De plus, l'entraînement incorporé s'avère plus efficace que l'entraînement additionnel. En DT, des améliorations sont également observées sur la performance de la tâche motrice pour les entraînements simultanés, avec une supériorité constante de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel. Au niveau des groupes, les trois entraînements incorporés s'améliorent entre les pré-tests et post-tests en ST motrice, tandis que seuls les deux groupes d'exergames incorporés (EM2I et SWITCH) progressent en DT cognitivo-motrice. Ces résultats suggèrent que la combinaison de sollicitations physiques, motrices et cognitives, en particulier lorsqu'elles sont incorporées, favorise le développement des compétences motrices en DT. Ainsi, comme le montrent par exemple les résultats de Pellegrini-Laplagne et al. (2022), l'entraînement additionnel (dans cette étude, pédaler sur un vélo stationnaire et jouer à des jeux) n'est potentiellement pas efficace pour améliorer les capacités de DT cognitivo-motrice, au même titre que l'entraînement uniquement physique (vélo stationnaire) et l'entraînement cognitif (*Presco, HappyNeuron*).

Toutefois, les bénéfices retrouvés dans la présente étude ne se traduisent pas dans le score de DTE (*Dual-Task Effect,* effet de la double-tâche), censé refléter le coût ou le bénéfice associé à l'ajout d'une tâche simultanée. Dans le cas de cette étude, l'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel pour améliorer les performances en ST motrice, et ce de manière importante, comme le reflète la taille d'effet élevée (d = 1,15). Cependant, la différence d'amélioration entre les deux conditions, observée en DT motrice, est bien réelle, mais est plus modérée (d = 0,39). Cette dissymétrie atténue artificiellement le DTE, car lorsque la performance en ST progresse davantage que celle en DT, le score relatif peut augmenter, masquant ainsi les gains réels en situation de DT. Ces résultats soulignent une limite importante du DTE en tant qu'indicateur unique : lorsque la performance en ST s'améliore significativement, le DTE peut apparaître comme plus négatif, même si la performance en DT s'améliore également. Ainsi, le DTE ne reflète pas toujours fidèlement les progrès réels en situation de DT. Cela explique la raison pour laquelle les contrastes indiquent que l'entraînement incorporé fait preuve d'une différences d'interférence plus importante que l'entraînement additionnel et que l'entraînement cognitif sur le DTE moteur (tendance significative). Conformément aux recommandations de Plummer et al. (2015), ces résultats soulignent l'importance pour les études futures d'intégrer à la fois des mesures relatives (DTE) et absolues (ST, DT), pour interpréter efficacement les effets des entraînements.

Concernant la performance cognitive, les résultats suggèrent un faible effet d'apprentissage (η^2 entre 0,01 et 0,03) pour la ST, la DT et le DTE. Aucun groupe actif ne présente d'évolution notable entre pré-tests et post-tests, et la seule différence significative concerne un contraste indiquant une dégradation du DTE pour le groupe entraînement cognitif par rapport à l'entraînement simultané (tendance significative).

Ainsi, bien que cela ne se reflète pas par une amélioration du DTE, l'entraînement incorporé, et notamment les programmes d'exergames EM2I et SWITCH, améliorent les performances motrices en DT, sans effet sur la performance cognitive. Ces résultats confirment ceux indiquant que le groupe EM2I génère des bénéfices moteurs mais non cognitifs en DT, par rapport à un programme de marche et de renforcement musculaire (Béraud-Peigné et al., 2024). Des modèles de visualisation de l'évolution en DTE se développent, notamment le « *Dual-Task Progress model* » (e.g., Gallou-Guyot et al., 2025), mais celui-ci n'a pas été testé, étant donné les limites présentées sur l'évolution du DTE dans cette étude.

4.3.2. Double-tâche cognitivo-cognitive

Les résultats de cette étude indiquent que les capacités de DT en situation cognitivo-cognitive ne semblent pas être améliorées par les entraînements mis en place. Un effet du temps est observé sur les deux DTE cognitifs (uniquement la mesure de l'écart-type pour la tâche de Go/No-Go), traduisant un effet d'apprentissage au test, bien que modeste (η^2 entre 0,01 et 0,03). Ce constat souligne l'importance d'intégrer un groupe contrôle inactif dans les études interventionnelle, sans quoi cet effet d'apprentissage aurait pu être interprété comme un effet positif des entraînements. Par ailleurs, la tâche utilisée ne semble probablement pas suffisamment exigeante pour générer des interférences cognitives importantes, nécessaires à une évaluation fine des effets de l'entraînement sur les capacités de DT cognitivo-cognitive. Ces résultats ne remettent donc pas en question la possibilité d'améliorer les capacités de DT cognitivo-cognitive, comme l'indiquent plusieurs études (e.g., Hawkins et al., 1992 ; Vrinceanu et al., 2021, études détaillées dans le cadre théorique), mais mettent en évidence les limites du test utilisé dans cette étude. Il apparaît ainsi nécessaire de développer ou d'utiliser des tests plus adaptés, permettant d'évaluer avec plus de sensibilité et de fidélité l'impact des entraînements sur la DT cognitivo-cognitive.

4.4. Impact de la virtualité

La nature de l'environnement d'entraînement simultané, qu'il soit virtuel (via des exergames) ou naturel, semble avoir un impact modéré et différencié selon les types de capacités évaluées. Dans cette étude, seules trois capacités (deux physiques, une cognitive) montrent une différence significative selon

la nature de l'environnement, suggérant que cet aspect de l'entraînement n'est pas un facteur déterminant global, mais peut tout de même influencer sélectivement certaines fonctions.

D'un point de vue cognitif, les entraînements simultanés virtuels, en l'occurrence les exergames, apparaissent plus efficaces pour améliorer les temps de réaction simples, en particulier dans les groupes EM2I et SWITCH. Plusieurs éléments peuvent expliquer ce résultat. D'une part, l'évaluation du temps de réaction est effectuée à l'aide d'un outil technologique (le système *Witty SEM*), dont l'environnement de test se rapproche de celui des entraînements d'exergames, facilitant ainsi un transfert dans un contexte d'apprentissage et de mesure relativement similaire (Barnett & Ceci, 2002). D'autre part, les exergames impliquent souvent une réponse rapide à des stimuli visuels et auditifs.

D'un point de vue physique et moteur, les environnements naturels sont plus efficaces pour améliorer la force du haut du corps et la coordination globale. Contrairement aux exergames, l'entraînement en contexte naturel (i.e., AM2C) mobilise les fonctions physiques et motrices dans des situations plus écologiques et concrètes, en intégrant uniquement des objets réels et des interactions directes avec l'environnement et les participants. Le contexte naturel offre ainsi une dimension sensorimotrice et contextuelle potentiellement plus transférable aux situations réelles. Cela peut favoriser un transfert plus efficace vers des tests moteurs complexes, réalisés dans des environnements réels, tels que le test de coordination ou le lancer de medicine ball.

La littérature reste très limitée sur la question de l'impact spécifique de la virtualité de l'environnement sur les effets des entraînements combinés. Il convient de souligner que les exergames utilisés dans la présente étude ne représentent pas le niveau le plus élevé de virtualité. Par exemple, la réalité virtuelle immersive n'a pas été testée. Enfin, la différence de sollicitations motrices et cognitives entre les formats testés ne permet pas d'isoler précisément l'effet de l'environnement (virtuel vs naturel). Pour répondre à cette question, des études contrôlées comparant deux programmes strictement équivalents sur tous les paramètres, à l'exception de l'environnement d'entraînement, sont nécessaires.

4.5. Effets spécifiques des programmes

Au-delà des comparaisons par modalités (e.g., simultané, incorporé, additionnel), l'analyse par programme permet de mettre en évidence des effets différenciés. Cette analyse plus fine est nécessaire, car la comparaison par contraste (e.g., simultané vs contrôle) peut surestimer les effets d'un programme spécifique et inversement sous-estimer les effets d'autres entraînements (limite présentée dans la partie 4.7).

EM2I présente le spectre d'effets le plus étendu, comportant des améliorations significatives des capacités physiques et motrices (i.e., force du bas et du haut du corps, équilibre dynamique, coordination, capacités aérobies), cognitives (i.e., temps de réaction, flexibilité cognitive, mémoire visuospatiale à court terme) et de la performance motrice en DT cognitivo-motrice. Ces évolutions sont cohérentes avec l'intensité maximale élevée observée en séance (discutés dans la partie 4.1.3), la complexité motrice engagée (partie 4.1.2), la stimulation cognitive riche et la proximité de contexte entre la sollicitation des exergames incorporés et les tests de temps de réaction (parties 4.2.1 et 4.4). AM2C améliore la force (bas et haut du corps), l'équilibre et la coordination. L'absence d'effet sur les mesures cognitives et sur les capacités aérobies, comparativement à EM2I, suggère que l'intérêt principal de ce programme repose sur sa nature motrice, liée à la variété et à la complexité des habiletés sollicitées. Le cadre d'environnement naturel d'AM2C peut également favoriser le transfert vers des tests moteurs réalisés en environnement réel (voir partie 4.4). SWITCH améliore la force des membres inférieurs, l'équilibre, la coordination, le temps de réaction et la performance motrice en DT. Son profil intermédiaire entre EM2I et AM2C combine des bénéfices physiques et moteurs et des gains cognitifs centrés sur le temps de réaction, sans effet sur les capacités aérobies ni sur la force du haut du corps. Ce manque d'effet peut être en lien avec une intensité maximale et une complexité motrice moins prononcée, ainsi que des déplacements moins importants (voir partie 4.1.3) que ceux des programmes EM2I et AM2C. Enfin, le programme additionnel VÉLO-JV n'induit qu'une amélioration de l'équilibre. L'absence de progression pour la force, les capacités aérobies et les mesures cognitives est cohérente avec une réduction de la charge de travail sur la composante physique (distance parcourue inférieure à VÉLO, voir partie 4.1.3) et/ou des interférences attentionnelles liées au partage des ressources entre deux tâches additionnelles, en phase avec la corrélation négative observée entre les intensités physique et cognitive (voir partie 4.2.2).

Au regard des programmes combinés (i.e., EM2I, AM2C, SWITCH, VÉLO-JV), ceux centrés sur une modalité présentent des effets moins prononcés. Le programme VÉLO améliore spécifiquement la force des membres inférieurs, en accord avec la nature de la charge physique (pédalage continu), sans effet sur la coordination, les capacités aérobies, les fonctions cognitives ou les capacités de DT. Le programme JV améliore spécifiquement l'inhibition confirmant un transfert ciblé vers le contrôle inhibiteur (parties 4.2.3 et 4.2.4) sans généralisation aux autres domaines cognitifs. Enfin, le GC présente une diminution de la flexibilité cognitive et des scores stables sur les autres tests, renforçant l'attribution causale des améliorations observées dans les groupes actifs.

Pris ensemble, ces résultats confirment et précisent les conclusions des sections précédentes. Premièrement, les programmes incorporés multi-domaine ou cognitivo-moteur (EM2I, AM2C, SWITCH) sont les plus susceptibles d'induire des gains de coordination et de force du bas du corps, comparativement à l'entraînement cognitivo-physique additionnel (VÉLO-JV). Deuxièmement, un entraînement simultané intermittent, avec un niveau d'intensité maximale élevée (EM2I), couplé à la solliciation d'habiletés motrices complexes et des capacités de marche, s'associe à des gains des capacités aérobies et de flexibilité cognitive et mémoire visuospatiale à court plus marqués (voir partie 4.2.1) alors q'une sollicitation continue et modérée (VÉLO, VÉLO-JV) est moins propice aux adaptations cognitives et de coordination (voir 4.1.3). Troisièmement, par rapport à ses références centrées sur une modalité, VÉLO-JV ne reproduit ni l'amélioration d'inhibition observée avec JV, ni les gains de force des membres inférieurs constatés avec VÉLO, suggérant un coût d'interférence dans cette combinaison additionnelle. Toutefois, VÉLO-JV améliore l'équilibre, et non VÉLO, illustrant qu'un bénéfice peut émerger de la sollicitation simultanée. Quatrièmement, les temps de réaction bénéficient davantage des exergames incorporés (EM2I, SWITCH), sur des tests reflétant un transfert proche au niveau du contexte (partie 4.4).

En somme, l'analyse par programme montre une supériorité d'EM2I, affine les conclusions globales et apporte un éclairage sur les modalités efficaces des interventions (intensité, complexité motrice, mode d'intégration des tâches, environnement d'entraînement). Cette échelle d'analyse est essentielle étant donné le nombre d'études, et notamment de méta-analyses qui opposent des catégories larges (combiné vs physique, incorporé vs additionnel), sans interroger plus finement le contenu de chacun des programmes. Cela pourrait ainsi expliquer les divergences de leurs résultats. Cependant, ce design à 7 groupes peut également atténuer la mise en évidence d'effets spécifiques (limite présentée dans la partie 4.7.).

4.6. Le plaisir, un facteur de compliance aux programmes

La complétion, la compliance (91,21 % en moyenne, sans différence significative entre les groupes), ainsi que les scores de plaisir sont élevés pour l'ensemble des groupes, avec des scores allant de 54,27/70 (JV) à 65,06/70 (AM2C). Ces résultats sont cohérents avec les données de la littérature soulignant une forte compliance des personnes âgées aux programmes d'exergames, avec des taux élevés de compliance et un faible taux d'abandon (Adcock et al., 2019 ; Da Silva Júnior et al., 2021 ; Wüest et al., 2014 ; Maillot et al., 2012 ; Schoene et al., 2013 ; Adcock et al., 2020). Concernant le plaisir, les résultats indiquent que l'entraînement simultané procure davantage de plaisir que les entraînements centrés sur une modalité (entraînement physique, entraînement cognitif). Cela suggère que la richesse

des différentes stimulations constitue un facteur clé pour une expérience plaisante de l'entraînement. Plus particulièrement, les intensités physiques moyenne et maximale sont toutes les deux liées positivement au plaisir perçu, dans des proportions similaires (respectivement r = 0,39 et r = 0,45). De manière intéressante, bien que la corrélation ne soit pas significative, il semble y avoir un lien inverse entre l'intensité cognitive subjective et le plaisir perçu (r = -0,17, p = 0,067). Cela peut refléter un seuil au-delà duquel la charge cognitive devient trop importante, diminuant ainsi l'aspect agréable de l'activité. Ce résultat, bien que non significatif statistiquement, mérite d'être approfondi, car il soulève une nouvelle fois la question de la conception d'une charge cognitive optimale dans les entraînements destinés aux personnes âgées : une surcharge cognitive pourrait induire de la frustration (comme observé pour le groupe VÉLO-JV dans l'étude 3) ou de la fatigue, réduisant la compliance à long terme et/ou influançant ainsi les effets des entraînements.

Les trois entraînements incorporés sont jugés plus plaisants que les programmes JV et VÉLO (à l'exception d'EM2I, où la différence n'est pas significative avec le groupe VÉLO). Concernant les exergames, plusieurs éléments propres aux dispositifs technologiques contribuent à une expérience plus plaisante et engageante : feedbacks visuels et auditifs instantanés, encouragements et bonus, qui rendent l'activité plus interactive et divertissante (Agmon et al., 2011). En combinant jeu et activité physique, les exergames permettent de transformer un exercice potentiellement monotone en une expérience motivante, favorisant ainsi l'engagement dans les programmes (Hoda et al., 2013). Cependant, bien qu'il ne repose pas sur une technologie numérique, le programme AM2C entraîne également un haut niveau de plaisir, probablement lié à la nature ludique et variée des exercices proposés, ce qui suggère que l'engagement ne dépend pas uniquement des technologies, mais aussi de la conception pédagogique et sociale des séances. Cela est confirmé par l'absence de différence significative sur le score de plaisir entre les entraînements simultanés virtuel et naturel. Ainsi, ces résultats confirment l'intérêt des exergames incorporés pour créer des entraînements plaisants pour les personnes âgées, mais également celui du programme AM2C.

4.7. Limites

La limite principale de cette étude concerne la randomisation non complète de l'étude, celle-ci ayant été faite naturellement et par grappes. Les participants ont été randomisés en fonction de leur période d'inclusion à l'étude (première inclusion en février 2023, dernière inclusion en septembre 2024) et du lieu des programmes (Paris, Créteil, Montreuil). Néanmoins, l'effet de ce manque de randomisation complète devrait être minime pour trois principales raisons. Premièrement, il n'existe pas de différence significative entre les groupes concernant l'âge, le niveau d'éducation, le sexe, le niveau cognitif global,

le niveau d'activité physique et l'IMC des participants. Sur l'ensemble des mesures physiques, motrices, cognitives et de DT, seuls deux scores (30 secondes assis-debout, DTE cognitivo-cognitif de la tâche cognitive 2) ont montré des différences entre les groupes et ces scores ont été intégrés comme covariable dans les analyses portant sur les mesures correspondantes pour contrôler l'effet des différences initiales entre les groupes. Deuxièmement, les stratégies de recrutement et les critères d'inclusion étaient comparables sur les trois lieux. Troisièmement, tous les participants ont été évalués et entraînés par les mêmes membres de l'équipe, formés spécifiquement à la passation des tests et à l'encadrement des séances.

Concernant l'échantillon, celui-ci représente une population en bonne santé, bien qu'inactive physiquement, vivant en communauté, sans trouble cognitif, avec un haut niveau d'éducation. Les résultats présentés ne sont donc attribuables qu'à ce type de public. De plus, l'échantillon est majoritairement féminin, ce qui n'a pas permis d'étudier la spécificité du sexe au regard des effets physiques et cognitifs. Une méta-analyse a montré que ce facteur pouvait modérer la relation entre l'entraînement (aérobie ou renforcement musculaire ou combinaison aérobie et renforcement musculaire) et la cognition chez les personnes âgées, avec des effets plus importants chez les femmes (Barha et al., 2017).

Une autre limite principale concerne l'échantillon qui a une taille totale, certes importante, mais dont le nombre de programmes conséquents réduit l'échantillon de participants par groupe (n = 15 à n = 23 en fonction des groupes). Cela peut expliquer la difficulté à démontrer des effets significatifs. En effet, l'analyse de puissance indique que 133 participants étaient nécessaires, ce qui a été respecté, mais la répartition finale entre les groupe n'était pas homogène. Néanmoins, ce nombre important de comparaisons constitue également la force de travail, qui est, à notre connaissance, la première à comparer dans la même étude : 1) l'entraînement simultané à un groupe contrôle ainsi qu'aux entraînements physique et cognitif, 2) l'entraînement incorporé à l'entraînement additionnel, et 3) différents types d'entraînements incorporés entre eux. Cette rigueur méthodologique représente à la fois une force et une complexité analytique importante. En effet, comparer sept groupes au sein d'une ANOVA à mesures répétées accroît la complexité statistique. Chaque groupe possède sa propre trajectoire temporelle, ce qui augmente le nombre de comparaisons possibles et réduit mécaniquement la puissance statistique pour détecter une interaction significative *temps*groupe*, notamment dans le cadre du vieillissement, où les échantillons possèdent des variabilités importantes. L'intégration d'un groupe contrôle passif répondait également à un souci de rigueur méthodologique. Effectivement, un effet principal unique du *temps* peut être "porté" par certains groupes qui s'améliorent, même si d'autres,

pris isolément, ne présentent pas de changement significatif. Dans le cas d'un design sans groupe contrôle passif, cela pourrait être interprété comme un effet similaire de l'entraînement. À l'inverse, l'intégration d'un groupe contrôle inactif rend impossible cette conclusion, l'effet serait assimilé à des facteurs externes (e.g., effet test-retest). Par exemple, un effet principal du temps est trouvé pour le test de force de préhension (*Handgrip*). Or, l'intégration d'un groupe contrôle passif et l'absence d'effet d'interaction *temps*groupe*, ne permet pas de conclure à un effet similaire de l'entraînement (conclusion probable sans groupe contrôle inactif). Pourtant, le groupe contrôle évolue de manière minime en passant de 23,96 kg en pré-tests à 24,35 kg en post-tests. D'autres groupes montrent des progrès plus marqués, probablement à l'origine d'effet du *temps*, comme le groupe AM2C, qui passe de 23,99 kg à 25,89 kg, mais que ce type de design ne permet pas de mettre en évidence statistiquement. En outre, l'interprétation des résultats requiert de nombreux contrastes post hoc, augmentant le risque d'erreur de type I. Dans cette étude, des corrections statistiques appropriées ont été systématiquement appliquées afin de limiter ce biais. Ainsi, le design à sept groupes, bien qu'exigeant sur le plan statistique, permet de tester de multiples hypothèses comparatives mais rend plus difficile la mise en évidence d'effets différentiels spécifiques à une modalité d'intervention. Cela pourrait expliquer l'absence d'effets significatifs pour certaines fonctions et la divergence avec certaines études qui n'empruntent pas ce type de design, mais souligne le caractère robuste des résultats obtenus.

Cette étude s'est spécifiquement intéressée à quatre contrastes[1] (en plus du contraste comparant l'entraînement simultané au groupe contrôle). Toutefois, plusieurs modérateurs ont pu influencer les différences d'effets, au-delà de ces simples catégorisations. Par exemple, concernant le contraste 1), l'entraînement physique consistait à pédaler sur un vélo stationnaire, tandis que l'entraînement simultané regroupait un programme avec une stimulation physique identique (VÉLO-JV), mais aussi trois autres programmes avec des stimulations physiques différentes (AM2C, EM2I, SWITCH). Pour le contraste b), l'entraînement cognitif reposait sur deux jeux vidéo (*New Super Mario Bros. U Deluxe* et *Mario Kart 8 Deluxe*), tandis que l'entraînement simultané comprenait un seul programme avec une stimulation cognitive identique à celle-ci (VÉLO-JV), et trois autres programmes aux stimulations cognitives distinctes (AM2C, EM2I, SWITCH). Cela justifie donc l'utilisation du groupe VÉLO-JV comme groupe de comparaison aux programmes uniquement physiques ou cognitifs. Toutefois, cela souligne

[1] Les contrastes étaient les suivants : comparaison des effets de a) l'entraînement simultané par rapport à l'entraînement physique, b) l'entraînement simultané par rapport à l'entraînement cognitif, c) l'entraînement incorporé par rapport à l'entraînement additionnel, et d) l'entraînement simultané virtuel par rapport à l'entraînement naturel.

également la possibilité que d'autres facteurs aient contribué aux différences d'effets observées entre les contrastes (e.g., sollicitation motrice et cognitive plus complexe, interactions sociales plus riches).

Enfin, cette étude a mis en évidence uniquement les effets des entraînements à court terme, immédiatement après la fin des programmes. Cependant, l'analyse des effets de rétention représente un point essentiel pour juger de l'efficacité d'un programme. De plus, dans le cadre de l'analyse de la proximité des effets de transfert, le contexte temporel, notamment la distance entre l'entraînement et l'évaluation, constitue l'un des critères de jugement (Barnett et Ceci, 2002). Ainsi, l'étude 5 vient compléter cette analyse à court terme, en évaluant si les effets observés se maintiennent et si certaines modalités des programmes influencent l'évolution des effets trois mois après leur arrêt.

ÉTUDE 5 – EFFETS DE RÉTENTION DE L'ENTRAÎNEMENT SIMULTANÉ SUR LES CAPACITÉS PHYSIQUES, MOTRICES, COGNITIVES, ET EN DOUBLE-TÂCHE CHEZ LES PERSONNES ÂGÉES : LE PROJET GAMAGE

1. OBJECTIFS

Cette étude constitue la seconde phase de l'étude 4, qui visait à évaluer les effets immédiats (i.e., mesurés directement après trois mois de programme) des entraînements simultanés, en particulier en comparant les modalités incorporée et additionnelle, ainsi qu'en confrontant l'entraînement simultané aux entraînements uniquement physique et cognitif. Cette seconde phase poursuit un objectif complémentaire : examiner les effets de rétention de ces entraînements, en évaluant leur maintien dans le temps selon les mêmes modalités expérimentales que celles de l'étude 4.

L'évaluation des effets de rétention est actuellement de plus en plus recommandée pour juger de l'efficacité des programmes d'intervention chez les personnes âgées (e.g., Ballesteros et al., 2018). D'une part, elle permet d'estimer dans quelle mesure les effets induits par l'entraînement se maintiennent (à moyen ou à long terme, en fonction de la durée de rétention), ce qui ne peut être mis en évidence que par le biais d'un suivi prolongé. D'autre part, certains effets, qu'ils soient cognitifs, physiques, moteurs ou de DT, peuvent ne pas apparaître immédiatement après l'intervention, mais émerger uniquement lors de cette période de suivi, comme cela a par exemple été observé dans les études de Rahe et al. (2015) et Eggenberger et al. (2015). Enfin, l'évaluation des effets de rétention permet également d'observer dans quelle mesure les participants maintiennent, sans encadrement, les comportements adoptés durant le programme (e.g., activité physique, entraînement cognitif), et d'en analyser l'impact sur la durabilité des effets obtenus.

Pour rappel, selon la théorie de la facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013 ; Kraft, 2012), les entraînements combinés, et plus spécifiquement ceux réalisés de manière simultanée, sont supposés être plus efficaces que les entraînements uniquement physique ou cognitif pour améliorer les fonctions cognitives (chapitre 4 du cadre théorique). En outre, au sein des entraînements simultanés, la modalité incorporée serait supérieure à l'additionnelle (Herold et al., 2018). Néanmoins, à ce jour, aucune théorie ni preuve empirique solide n'indique l'avantage d'une modalité d'entraînement spécifique en ce qui concerne le maintien des effets. En effet, malgré l'intérêt des mesures de rétention, très peu d'études

sur l'entraînement combiné incluent ce type de mesure. À notre connaissance, deux méta-analyses comparent les effets cognitifs et/ou physiques à long terme de l'entraînement combiné par rapport à des interventions uniquement physique, cognitive ou à un groupe contrôle (Rieker et al., 2022 pour les effets cognitifs et physiques ; Zhu et al., 2016 pour les effets cognitifs). À noter que dans les deux études, il s'agit d'un questionnement secondaire, l'objectif principal concernant les effets à court terme. Parmi les vingt études incluses dans la méta-analyse de Zhu et al. (2016), seules trois (Linde & Alfermann, 2014 ; Oswald et al., 2006 ; Rahe et al., 2015) comportent des mesures de rétention (avec un suivi variant de 12 semaines à 5 ans ; pour le détail des trois études concernées, voir la partie 2.4 du chapitre 4 du cadre théorique). Les auteurs rapportent tout de même un effet significatif modéré de l'entraînement combiné par rapport à un groupe contrôle passif, en accord avec les résultats de la méta-analyse de Rieker et al. (2022). Les comparaisons avec des entraînements cognitif ou physique seuls sont en revanche, non significatives, bien qu'une tendance pour l'entraînement combiné soit suggérée pour les deux comparaisons (p = 0,06), encourageant ainsi la réalisation de nouvelles études. Rieker et al. (2022) rapportent un maintien par rapport à l'entraînement physique mais non en comparaison à l'entraînement cognitif.

Concernant spécifiquement l'entraînement simultané, et notamment la comparaison entre l'entraînement incorporé et additionnel, l'étude interventionnelle d'Eggenberger et al. (2015) apporte quelques perspectives[1]. Les auteurs ont comparé les effets de deux programmes simultanés (6 mois, 2 séances d'une heure par semaine), l'un incorporé (i.e., exergames), l'autre additionnel (i.e., marche sur tapis, couplée à une tâche cognitive) à un programme uniquement physique (i.e., marche sur tapis). Un an après la fin des programmes, les résultats montrent un maintien des performances de plusieurs fonctions cognitives, notamment la vitesse de traitement de l'information, la mémoire de travail et la mémoire visuelle à long terme, avec des effets comparables entre les entraînements simultanés et l'entraînement physique. Tous les groupes ont également montré une amélioration différée de la flexibilité cognitive. Ainsi, les effets de rétention sont similaires entre les groupes.

Concernant les capacités physiques, les résultats de Rieker et al. (2022) indiquent que l'entraînement combiné, comparativement au groupe contrôle présente des effets entre les pré-tests et la rétention, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il est comparé à l'entraînement physique. L'analyse n'a pas pu être réalisée entre les entraînements combiné et cognitif. De plus, la méta-analyse de Janhunen et al.

[1] Le protocole de cette étude, ainsi que les résultats sont présentés en détail dans les parties 2.4 du chapitre 4 du cadre théorique (effets de rétention) et 3.2.2 du même chapitre (effets différenciés des entraînements incorporé et additionnel).

(2021), portant spécifiquement sur les exergames, indique que les améliorations observées au niveau de la marche semblent se maintenir à long terme (13 des 58 études incluant un suivi de 3 à 36 semaines). D'autres études interventionnelles soutiennent l'idée d'une stabilité des bénéfices obtenus après des programmes combinés (e.g., Laatar et al., 2018 ; Norouzi et al., 2019).

Malgré ces premiers résultats encourageants, les études s'intéressant aux effets de rétention comportent plusieurs limites méthodologiques qui compromettent l'interprétation des effets observés. Une grande partie de ces études ne comprend pas de groupe contrôle inactif (e.g., Eggenberger et al., 2015 ; Hötting et al., 2012 ; Laatar et al., 2018 ; Rahe et al., 2015), rendant difficile la distinction entre les effets réels de l'intervention et ceux liés à la répétition des tests (test-retest). Cet effet est d'autant plus accentué puisqu'une mesure supplémentaire est introduite en phase de rétention. D'autres études ne suivent pas l'évolution du mode de vie (e.g., pratique d'activités physiques ou cognitives) après l'intervention (e.g., Eggenberger et al., 2015 ; Norouzi et al., 2019 ; Oswald et al., 2006) ou réservent une partie des évaluations à certains groupes (e.g., l'étude de Rahe et al. (2015) ne suit le niveau d'activité physique déclaré que du groupe d'entraînement combiné). Cela limite la possibilité d'attribuer les effets de rétention à l'intervention elle-même, plutôt qu'à des comportements potentiellement modifiés après le programme. Une autre limite méthodologique, déjà soulevée pour les effets à court terme, concerne l'inégalité des temps d'entraînement entre les groupes expérimentaux (notamment dans le cas des modalités séquentielles) retrouvée dans plusieurs études sur les entraînement combinés (e.g., Oswald et al., 2006 ; Rahe et al., 2015). Enfin, il n'existe pas, à notre connaissance, de travail comparant les effets de rétention de différents types d'entraînements simultanés (incorporé vs additionnel), aux entraînements physique et cognitif seuls, ainsi qu'à un groupe contrôle. Dans ce contexte, il apparaît indispensable de renforcer la rigueur méthodologique des futures études. Par ailleurs, le choix de la durée du suivi représente également un défi. La littérature fait état de suivis allant de 3 mois (e.g., Norouzi et al., 2019) à 5 ans (e.g., Oswald et al., 2006), mais les études dépassant un an restent rares, principalement en raison des difficultés à maintenir le contact avec les participants et à contrôler les facteurs confondants. À ce jour, aucun consensus n'existe quant à la durée optimale concernant les mesures de rétention.

Dans cette étude, quatre questions de recherche sont examinées afin d'évaluer la conservation des effets à long terme, tant sur les capacités physiques, motrices, cognitives que de DT : 1) L'entraînement simultané est-il plus efficace pour maintenir ses effets qu'une stimulation cognitive ou physique ? 2) L'entraînement incorporé génère-t-il des effets de rétention distincts de l'entraînement additionnel ? 3) Tous les entraînements additionnels sont-ils équivalents pour maintenir leurs effets ?

4) Les effets des entraînements simultanés sont-ils davantage maintenus lorsqu'ils sont réalisés dans un environnement virtuel que naturel ?

Au regard des résultats antérieurs, il est attendu que les bénéfices observés entre les pré-tests et post-tests se maintiennent lors des mesures de rétention. Cependant, la majorité des gains dans l'étude 4 ayant été observée au sein des groupes d'entraînement simultané, il est supposé qu'ils bénéficieront d'un effet de rétention plus marqué que les groupes ayant suivi un entraînement exclusivement physique ou cognitif. De plus, il est attendu que les capacités ayant montré des améliorations plus importantes à court terme (avec de fortes taille d'effet), soient mieux consolidées. Par exemple, la force du bas du corps (d = 1,07 pour l'entraînement simultané comparé au groupe contrôle), pourrait présenter une meilleure rétention qu'une capacité telle que la mémoire visuospatiale à court terme, dont l'effet était plus modéré (d = 0,45 pour l'entraînement simultané comparé au groupe contrôle). Toutefois, la question du maintien différencié selon la modalité d'entraînement simultané (additionnel vs incorporé, virtuel vs naturel) demeure ouverte, en l'absence d'un consensus théorique ou empirique sur ce point.

2. MÉTHODE

Cette étude s'appuie sur le protocole de l'étude 4, auquel est intégré un temps de mesure supplémentaire afin d'évaluer les effets de rétention. Les modifications méthodologiques apportées en conséquence sont décrites dans cette partie.

2.1. Population

Les critères d'inclusion de cette étude sont identiques à ceux de l'étude 4. Uniquement les données des participants ayant réalisé l'ensemble des temps de mesure (i.e., pré-tests, post-tests, tests de rétention) ont été intégrées dans cette étude. Les participants ont été recontactés par mail et/ou par téléphone un mois et demi après la fin des programmes, afin de planifier le rendez-vous des tests de rétention. Une analyse de puissance a été réalisée sur la base du principal test statistique prévu pour cette étude (ANOVA, 3 mesures répétées, interaction intra-sujets et inter-sujets). Les paramètres utilisés étaient identiques à ceux de l'étude 4 (f = 0,20, α = 0,05, puissance = 0,95, η^2 = 0,04). L'analyse indique que 112 participants étaient nécessaires pour tester les principales hypothèses de cette étude.

2.2. Procédure

L'étude s'est déroulée sur 26 semaines pour chaque participant. Les participants ont été évalués en pré-tests (semaine 1), ont suivi un programme de 12 semaines (semaines 2 à 13) et ont été de

nouveau évalués en post-tests (semaine 14) et en tests de rétention (semaine 26). La répartition des participants entre chaque groupe, ainsi que les abandons et les motifs de ces abandons sont présentés dans la Figure 45.

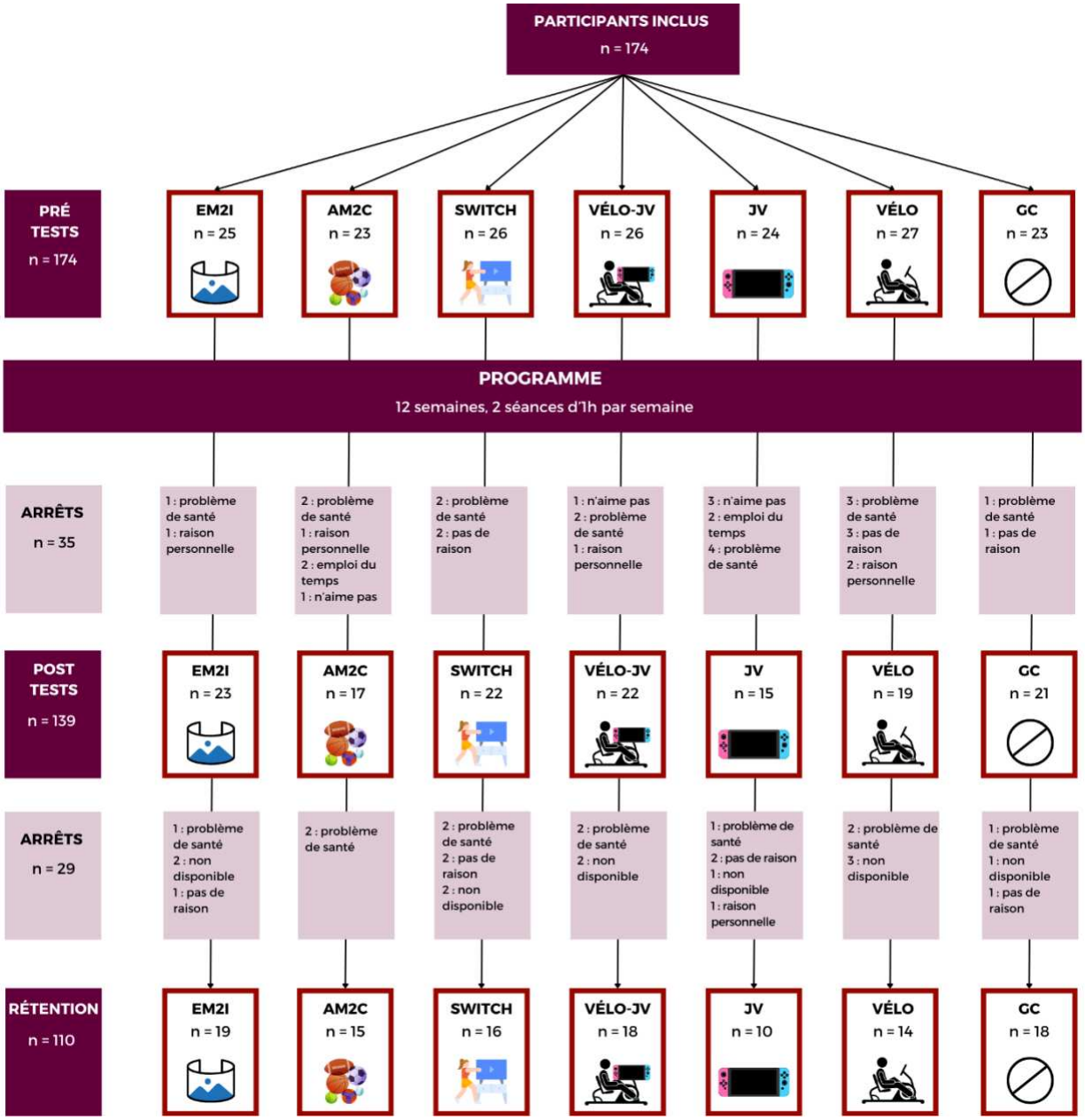


Figure 45. Répartition des participants, abandons et suivi à chaque étape de l'étude par groupe expérimental (étude 5)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; n : nombre ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

2.3. Les programmes

Les programmes sont identiques à ceux réalisés et présentés en étude 4.

2.4. Mesures

Les mesures utilisées dans cette étude ont été effectuées en pré-tests, en post-tests et en rétention (Figure 46). Le délai de 12 semaines entre la fin des programmes et les tests de rétention a été choisi à la fois pour assurer une symétrie avec la durée du programme et pour des raisons de faisabilité liées au calendrier de la thèse. Il correspond également au choix retenu par plusieurs études (e.g., Barban et al., 2017 ; Linde & Alfermann, 2014 ; Norouzi et al., 2019) évaluant des programmes relativement courts (inférieurs à 6 mois).

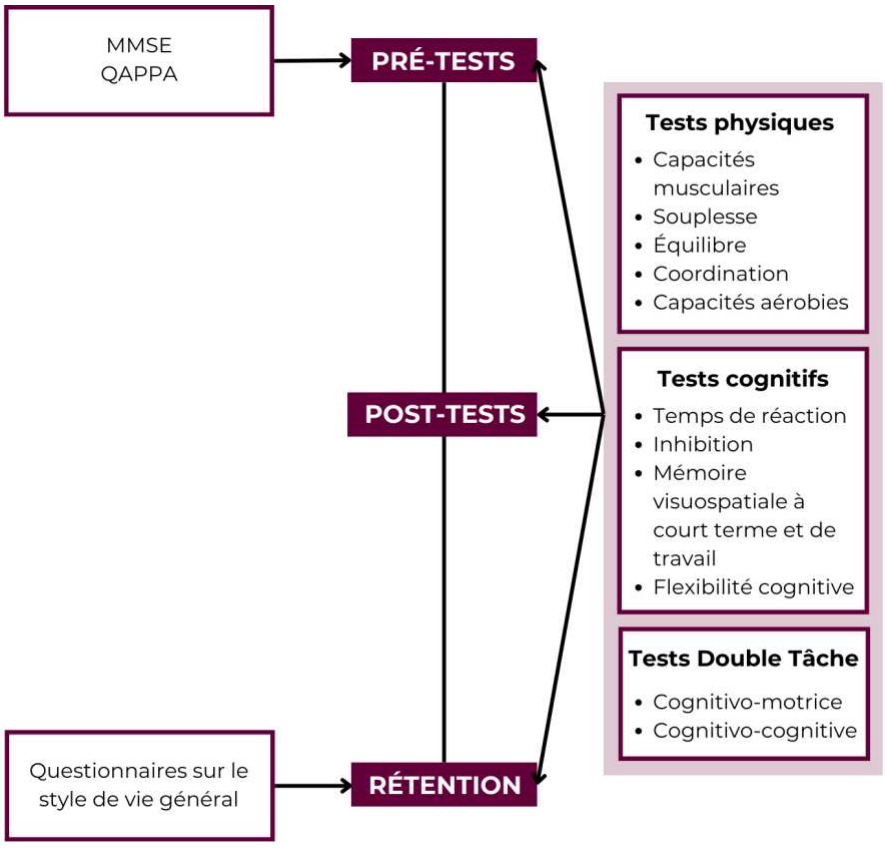


Figure 46. Variables testées en fonction des temps de mesure (étude 5)

Note. *MMSE : Mini-Mental State Examination ; QAPPA : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées.*

L'ensemble des tests physiques, moteurs ; cognitifs et de DT a été présenté en étude 4 (voir partie 2.4.2 de l'étude 4). Pour la DT, uniquement les résultats en ST et DT sont pris et compte (et non DTE) étant donné les limites présentées dans la discussion (partie 4.3) de l'étude 4.

- **Suivi du style de vie**

Un questionnaire de suivi du style de vie a été complété par l'ensemble des participants lors des trois temps de mesure afin de suivre les comportements adoptés par les participants au cours de l'étude.

Questionnaire sur le Style de Vie Général (*General Lifestyle Questionnaire,* GLQ). Ce questionnaire conçu en français (Lopez-Fontana et al., 2020) mesure cinq dimensions du mode de vie : « activités physiques », « activités cognitives », « activités sociales », « autres activités de loisir » et « autres comportements de santé » (sommeil et consommations – alimentation, tabac et alcool) au cours de l'année écoulée. Les scores du GLQ sont calculés en fonction de la fréquence de pratique de chaque activité ou comportement. Pour chaque item, les participants indiquent la fréquence sur une échelle de Likert en 5 points (de 1 = jamais à 5 = tous les jours ou presque), avec certains items inversés.

2.5. Analyse des données

Seuls les participants ayant complété les pré-tests, les post-tests et les tests de rétention sont inclus (110 participants, détails dans la Figure 26). Les étapes 3.1 et 3.2 de l'étude 4 ont été reproduites pour vérifier l'équivalence initiale des groupes [comparaison des variables personnelles (3.1) et des scores aux pré-tests (3.2)], et l'étape 3.4 a été réappliquée avant d'analyser de nouveau les évolutions en fonction du groupe et du temps. Pour cela, une analyse de variance (ANOVA) à trois mesures répétées [facteur intra-sujet : temps (pré-tests vs post-tests vs tests de rétention), facteur inter-sujet : groupe (AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV, VÉLO, JV, GC)] a été effectuée. Des contrastes planifiés ont également été conduits pour tester les mêmes six hypothèses spécifiques entre les pré-tests et les post-tests, mais ici également entre les pré-tests et les tests de rétention, ainsi qu'entre les post-tests et les tests de rétention. En cas de violation de la sphéricité (test de Mauchly) pour les ANOVA à trois temps de mesure, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée (voir Annexe 25).

Étant donné la modification de l'échantillon entre l'étude 4 et 5 suite à la perte de participants lors de la phase de rétention, certains résultats statistiques obtenus entre les pré-tests et les post-tests diffèrent (certains montrent une amélioration ou à l'inverse ne montrent pas d'effet contrairement à l'étude 4). De ce fait, pour l'étude 5, des analyses préalables ont été effectuées afin de vérifier l'adéquation des résultats entre les pré-tests et les post-tests pour les deux études. Le critère de

jugement est basé sur l'analyse des contrastes planifiés. L'ensemble des contrastes devait montrer des résultats simILaires à plus ou moins un contraste près. Par exemple, sur l'étude 4, le score 30 secondes assis-debout montre des différences significatives sur les six contrastes. Cette variable est conservée en étude 5 s'il est également retrouvé six (ou cinq) contrastes significatifs. La taille d'effet n'est pas prise en compte comme critère de sÉlection.

Ainsi, pour cette étude 5, trois scores physiques (TUG, Handgrip, TM6), quatre cognitifs (TR 8 inhibition, empan simple Corsi, empan inverse Corsi, TMT B-A) et un en DT (DT cognitivo-motrice) ne remplissent pas les conditions. L'analyse est donc effectuée sur cinq scores physiques et moteurs (30 secondes assis-debout, lancer de medicine ball, test de coordination, gratte-dos, *sit-and-reach test*), sept scores cognitifs (TR 2 choix, TR 8 choix, score inhibition, Go/No-Go–Temps (moyenne), Go/No-Go-Temps (écart-type), Go/No-Go-Erreurs, TMT B) et les quatre composantes de la DT cognitivo-cognitive (ST tâches cognitives 1 et 2, DT tâches cognitives 1 et 2).

3. RÉSULTATS

3.1. Comparaison initiale des variables personnelles entre les groupes

Les variables personnelles des participants (i.e., âge, sexe, IMC, santé subjective, QAPPA, MMSE) sont indiquées dans le Tableau 23. Il n'y a pas de différence significative entre les groupes.

3.2. Comparaison des performances des groupes en pré-tests

Les performances en pré-tests ont de nouveau été comparées pour les tests physiques, moteurs, cognitifs et de DT (Annexe 26). Au niveau cognitif, il y a une différence significative pour le TMT B ($F(6, 102) = 2{,}73$, $p = 0{,}017$, $\eta^2 = 0{,}14$). Les analyses post hoc indiquent une différence entre SWITCH et GC ($t(102) = 3{,}15$, $p = 0{,}034$, $d = 1{,}08$) et entre SWITCH et JV ($t(102) = 3{,}20$, $p = 0{,}029$, $d = 1{,}29$). Cette variable a donc été intégrée comme covariable dans l'analyse de ce score, afin de contrôler l'effet des différences initiales entre les groupes. Les scores au questionnaire GLQ en pré-tests ont également été comparés (Annexe 27). Une seule différence significative est observée sur la composante « activités physiques » ($F(6, 62{,}01) = 2{,}41$, $p = 0{,}037$, $\eta^2 = 0{,}14$). Toutefois, les tests post hoc ne révèlent aucune différence significative entre les groupes, les scores sont donc considérés comme équivalents.

Afin de répondre aux hypothèses d'homogénéité des variances et de sphéricité exigées par les ANOVA, plusieurs traitements statistiques ont été appliqués. Ces traitements sont décrits en détail en Annexe 25.

Tableau 23. Caractéristiques personnelles des participants (étude 5)

	AM2C ***n*** **= 15**	**EM2I** ***n*** **= 19**	**SWITCH** ***n*** **= 16**	**VÉLO-JV** ***n*** **= 18**	**VÉLO** ***n*** **= 14**	**JV** ***n*** **= 10**	**GC** ***n*** **= 18**	***p***
	Moyenne (ET)	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	
Âge (années)	67,33 (3,22)	68,78 (5,34)	71,25 (5,63)	69,33 (6,52)	69,71 (6,34)	70,10 (5,61)	69,17 (5,34)	0,631
Femme (%)	86,67	72,22	93,75	77,78	71,43	60	66,67	0,388
MMSE (score)	28,87 (0,99)	29,44 (0,78)	28,87 (1,09)	29,11 (0,83)	29,07 (0,73)	29,40 (0,70)	29,00 (0,91)	0,401
QAPPA (MET/semaine)	204,00 (153,47)	266,11 (199,33)	132,50 (132,73)	218,89 (290,27)	355,71 (462,51)	370,00 (273,62)	158,33 (330,85)	0,248^{+}
Santé subjective (score)	3,93 (0,70)	3,67 (0,77)	3,69 (0,60)	3,94 (0,64)	3,86 (0,66)	3,70 (0,67)	4,00 (0,77)	0,685
Années d'éducation[1]	13,67 (3,20)	14,50 (3,24)	13,69 (1,89)	14,25 (3,07)	15,19 (2,56)	16,30 (2,58)	15,76 (1,85)	0,078
IMC (kg/m^2)	26,13 (4,29)	27,48 (4,24)	25,34 (5,46)	24,67 (4,34)	23,58 (4,04)	25,97 (4,74)	24,32 (3,19)	0,207

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; ET : Écart-Type ; GC : Groupe Contrôle ; IMC : Indice de Masse Corporelle ; JV : Jeux Vidéo ; kg : kilogramme ; m : mètre ; MET : Metabolic Equivalent of Task (équivalent métabolique) ; MMSE : Mini-Mental State Examination ; n : nombre ; QAPPA : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.* $^{+}$ *: la correction de Brown-Forsythe est appliquée pour corriger l'inégalité des variances.*

[1] La 1ère année d'éducation est en primaire. Douze années d'éducation correspondent au BAC.

3.3. Comparaison de l'effet des programmes en fonction des groupes

3.3.1. Capacités physiques et motrices

Les scores obtenus aux pré-tests, aux post-tests et aux tests de rétention, ainsi que les résultats des ANOVA et des analyses post hoc pour les mesures physiques et motrices sont présentés dans le Tableau 24. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour le score de coordination du bas du corps. Une transformation logarithmique a été appliquée afin de corriger cette hétérogénéité. Toutefois, les variances demeurent inégales, malgré la transformation. Seuls les effets significatifs du *temps*, du *groupe* et de l'interaction *temps x groupe* des ANOVA sont rapportés dans le texte. Afin d'alléger la présentation des résultats, les effets non significatifs ne sont pas détaillés.

3.3.1.1. Capacités musculaires

Assis debout. Un effet principal du *temps* est observé ($F(2, 198) = 25{,}84$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}04$). Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests ($t(99) = 7{,}13$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}53$), ainsi qu'entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(99) = 4{,}01$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}31$), malgré une diminution entre les post-tests et les tests de rétention ($t(99) = 3{,}09$, $p = 0{,}003$, $d = 0{,}21$). Il y a également une interaction *temps* × *groupe* ($F(12, 198) = 3{,}86$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}04$). Les analyses post hoc montrent des améliorations significatives entre les pré-tests et les post-tests pour les groupes suivants :

- AM2C ($t(99) = 6{,}03$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}16$),
- EM2I ($t(99) = 4{,}65$, $p = 0{,}002$, $d = 0{,}82$),
- SWITCH ($t(99) = 4{,}38$, $p = 0{,}006$, $d = 0{,}90$).

Le groupe AM2C montre également une amélioration entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(99) = 4{,}81$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}98$), tandis que le groupe SWITCH présente une régression entre les post-tests et les tests de rétention ($t(99) = 4{,}82$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}93$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 47) révèlent qu'entre les pré-tests et les post-tests, les entraînements simultané ($t(99) = 2{,}41$, $p = 0{,}018$, $d = 0{,}48$) et incorporé ($t(99) = 3{,}26$, $p = 0{,}002$, $d = 0{,}68$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. L'entraînement simultané est supérieur aux entraînements physique ($t(99) = 2{,}07$, $p = 0{,}041$, $d = 0{,}45$) et cognitif seuls ($t(99) = 2{,}79$, $p = 0{,}006$, $d = 0{,}70$). De plus, l'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel ($t(99) = 3{,}84$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}80$), et l'entraînement simultané naturel dépasse l'entraînement simultané virtuel ($t(99) = 2{,}41$, $p = 0{,}018$, $d = 0{,}53$).

Tableau 24. Résultats physiques et moteurs en pré-tests, en post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5)

			AM2C	EM2I	SWITCH	VÉLO-JV	VÉLO	JV	GC
	Effets ANOVA		*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*
Capacités musculaires									
30 s assis-debout (n)	**Temps*** **	Pré-tests	11,40 (2,41)	12,50 (3,99)	13,15 (4,78)	14,50 (3,13)	15,07 (5,25)	13,30 (3,95)	13,22 (3,02)
	Groupe	Post-tests	15,73 (3,63)^{aaa}	15,56 (3,52)^{aa}	16,54 (3,86)^{aa}	15,11 (3,23)	16,21 (5,03)	13,50 (4,30)	14,28 (2,49)
	Interaction* **	Rétention	15,06 (4,53)^{cc}	14,94 (3,80)	13,08 (2,96)^{bb}	14,72 (2,37)	15,43 (4,70)	13,30 (4,32)	14,83 (3,09)
Lancer de medicine ball (cm)	**Temps*** **	Pré-tests	286,67 (55,71)	307,19 (67,19)	266,53 (47,52)	298,61 (56,18)	268,75 (67,64)	303,80 (69,76)	307,76 (54,51)
	Groupe	Post-tests	315,93 (56,10)^{aa}	326,75 (76,21)	275,67 (53,22)	289,17 (49,79)	277,92 (62,23)	308,80 (77,96)	313,76 (61,68)
	Interaction*	Rétention	313,00 (51,81)	322,87 (87,90)	283,47 (48,62)	300,78 (55,35)	279,08 (58,52)	306,00 (65,61)	315,24 (62,50)
Souplesse									
Sit-and-reach (cm)	**Temps***	Pré-tests	20,29 (13,21)	15,42 (12,53)	22,39 (7,80)	21,21 (10,07)	16,18 (13,64)	15,10 (10,43)	19,72 (10,87)
	Groupe	Post-tests	21,21 (12,66)	18,73 (10,86)	22,07 (8,32)	21,88 (9,27)	17,36 (13,61)	15,00 (13,45)	20,64 (11,85)
	Interaction	Rétention	20,39 (14,62)	18,12 (11,48)	20,14 (10,56)	20,85 (9,81)	13,75 (16,00)	15,85 (12,88)	19,61 (13,50)
Gratte-dos (cm)	**Temps***	Pré-tests	1,47 (0,15)	1,46 (0,12)	1,49 (0,10)	1,38 (0,38)	1,42 (0,17)	1,46 (0,12)	1,55 (0,08)
	Groupe	Post-tests	1,48 (0,14)	1,52 (0,10)	1,50 (0,09)	1,43 (0,23)	1,44 (0,16)	1,47 (0,10)	1,55 (0,11)
	Interaction	Rétention	1,44 (0,19)	1,51 (0,90)	1,50 (0,08)	1,45 (0,22)	1,39 (0,24)	1,50 (0,10)	1,55 (0,12)
Coordination									
Test de coordination (s)	**Temps*** **	Pré-tests	26,27 (5,09)	27,01 (4,70)	32,52 (10,31)	29,91 (11,77)	27,58 (6,98)	24,44 (7,90)	25,72 (3,61)
	Groupe**	Post-tests	19,38 (4,60)^{aaa}	19,32 (3,07)^{aaa}	27,58 (7,04)	27,21 (10,11)	25,57 (7,44)	21,11 (5,18)	24,22 (4,23)
	Interaction* **	Rétention	20,83 (5,62)^{ccc}	20,56 (3,53)^{ccc}	29,50 (8,29)	26,50 (9,03)	26,23 (7,67)	20,81 (5,48)	22,15 (3,02)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; JV : Jeux Vidéo ; GC : Groupe Contrôle ; m : mètre ; M : Moyenne ; n : nombre ; s : seconde ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*

Une diminution des scores au test de coordination représente une amélioration de la performance.

*Pour les effets sur les ANOVA, * : p < 0,05 ; ** : p < 0,01 ; *** : p < 0,001. Code lettres (a, b, c) : indique les différences significatives en post hoc, au sein d'un groupe : a (pré-tests vs post-tests), b (post-tests vs tests de rétention), c (pré-tests vs tests de rétention). Code couleurs (rouge, vert) : indique les différences significatives en post hoc, au sein d'un groupe : vert (amélioration), rouge (diminution). Code nombre de lettres (a, aa, aaa) : indique les différences significatives en post hoc, au sein d'un groupe : a (p < 0,05), aa (p < 0,01), aaa (p < 0,001). Exemple de lecture : aaa au niveau du score post-tests pour le groupe AM2C signifie qu' il y a une amélioration significative à p < 0,001 entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe AM2C au test 30 s assis-debout.*

Cependant, les effets observés entre les pré-tests et les post-tests ne se maintiennent pas totalement : entre les post-tests et les tests de rétention, les contrastes indiquent une régression pour les entraînements simultané ($t(99) = 2,65$, $p = 0,009$, $d = 0,49$) et incorporé ($t(99) = 2,96$, p = 0,003, d = 0,57) par rapport au groupe contrôle. Les seuls contrastes qui demeurent significatifs entre les pré-tests et les tests de rétention concernent la comparaison entre les entraînements incorporé et additionnel ($t(99) = 2,17$, $p = 0,032$, $d = 0,48$) et entre les entraînements simultanés naturel et virtuel ($t(99) = 3,21$, $p = 0,002$, $d = 0,75$).

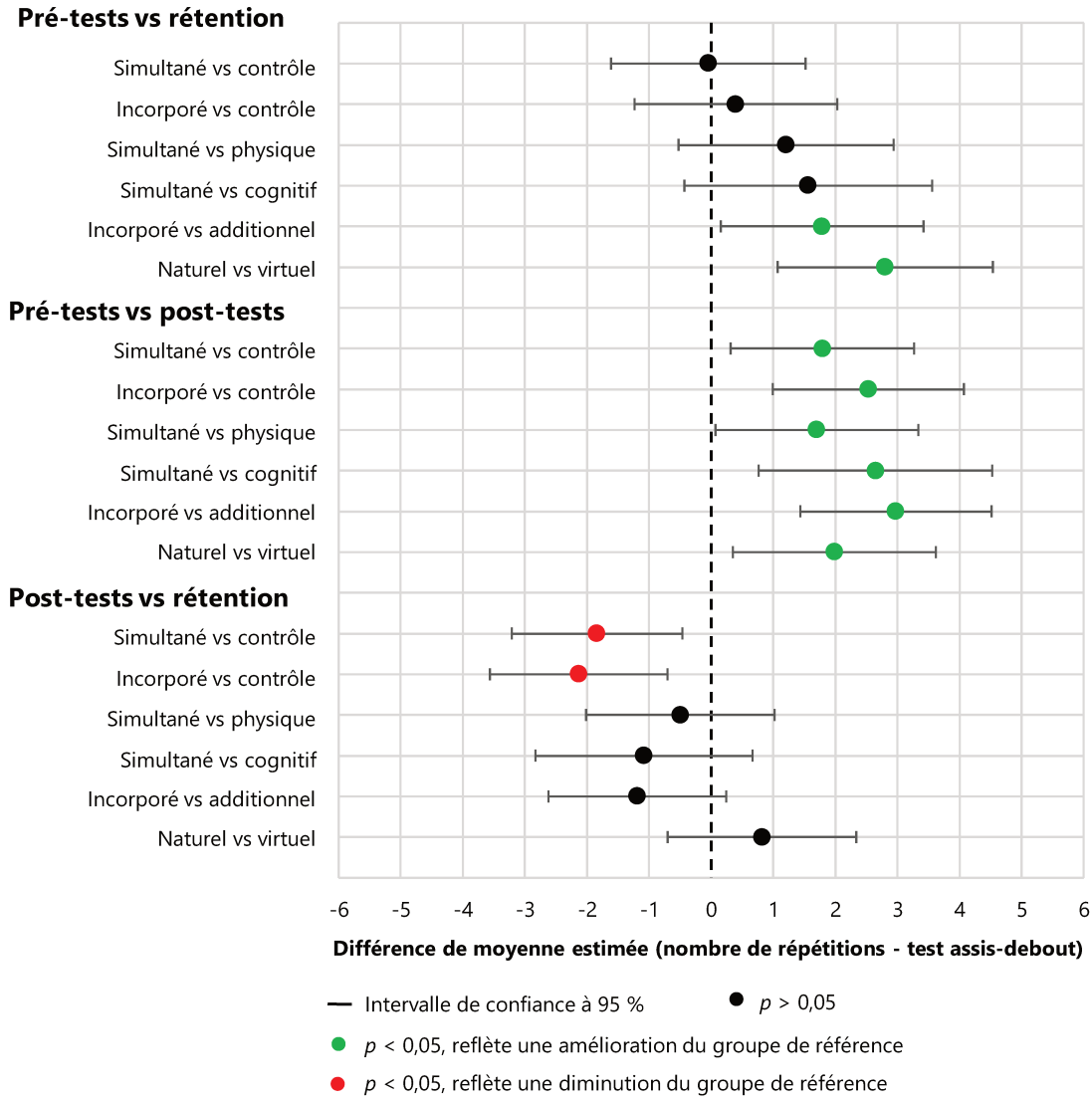


Figure 47. Différences d'évolution au test 30 secondes assis-debout en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle entre les pré-tests et les post-tests : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 2 unités qui correspond à une amélioration d'environ 2 répétitions supplémentaires au test 30 secondes assis-debout pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Lancer de medicine ball. Il y a un effet principal du *temps* ($F(2, 192) = 11{,}24$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}007$). Les analyses post hoc indiquent une amélioration significative entre les pré-tests et les post-tests ($t(96) = 3{,}98$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}16$) et entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(96) = 4{,}05$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}19$). Il y a également une interaction significative *temps x groupe* ($F(12, 192) = 1{,}97$, $p = 0{,}029$, $\eta^2 = 0{,}007$). Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe AM2C ($t(96) = 4{,}62$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}48$), cependant, la différence n'est pas significative entre les pré-tests et les tests de rétention.

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 48) indiquent qu'entre les pré-tests et les post-tests, l'entraînement incorporé s'améliore davantage que l'additionnel ($t(96) = 4{,}21$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}47$) ainsi que l'entraînement simultané naturel par rapport à l'entraînement simultané virtuel ($t(96) = 3{,}16$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}47$). Il y a également une tendance significative en faveur de l'entraînement incorporé par rapport au groupe contrôle ($t(96) = 1{,}91$, $p = 0{,}059$, $d = 0{,}22$). L'effet se maintient pour l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel ($t(96) = 4{,}05$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}19$) puisque le contraste est toujours significatif entre les pré-tests et les tests de rétention. Il n'y a pas de contraste significatif entre les post-tests et les tests de rétention.

3.3.1.2. Souplesse

Sit-and-reach. Il y a un effet principal du *temps* ($F(1{,}64, 159{,}40) = 3{,}76$, $p = 0{,}050$, $\eta^2 = 0{,}003$). Les analyses post hoc indiquent une différence entre les post-tests et les tests de rétention ($t(97) = 3{,}34$, $p = 0{,}004$, $d = 0{,}10$).

Contrastes. Le seul contraste signficatif concerne la compraison entre l'entraînement physique et l'entraînement simultané entre les post-tests et les tests de rétention, indiquant une diminution pour l'entraînement physique ($t(97) = 2{,}41$, $p = 0{,}018$, $d = 0{,}21$).

Gratte-dos. Il y a un effet principal du *temps* ($F(2, 192) = 3{,}03$, $p = 0{,}033$, $\eta^2 = 0{,}002$). Les analyses post hoc indiquent une tendance significative à l'amélioration entre les pré-tests et les post-tests ($t(96) = 2{,}42$, $p = 0{,}052$, $d = 0{,}13$). Aucun contraste n'est significatif.

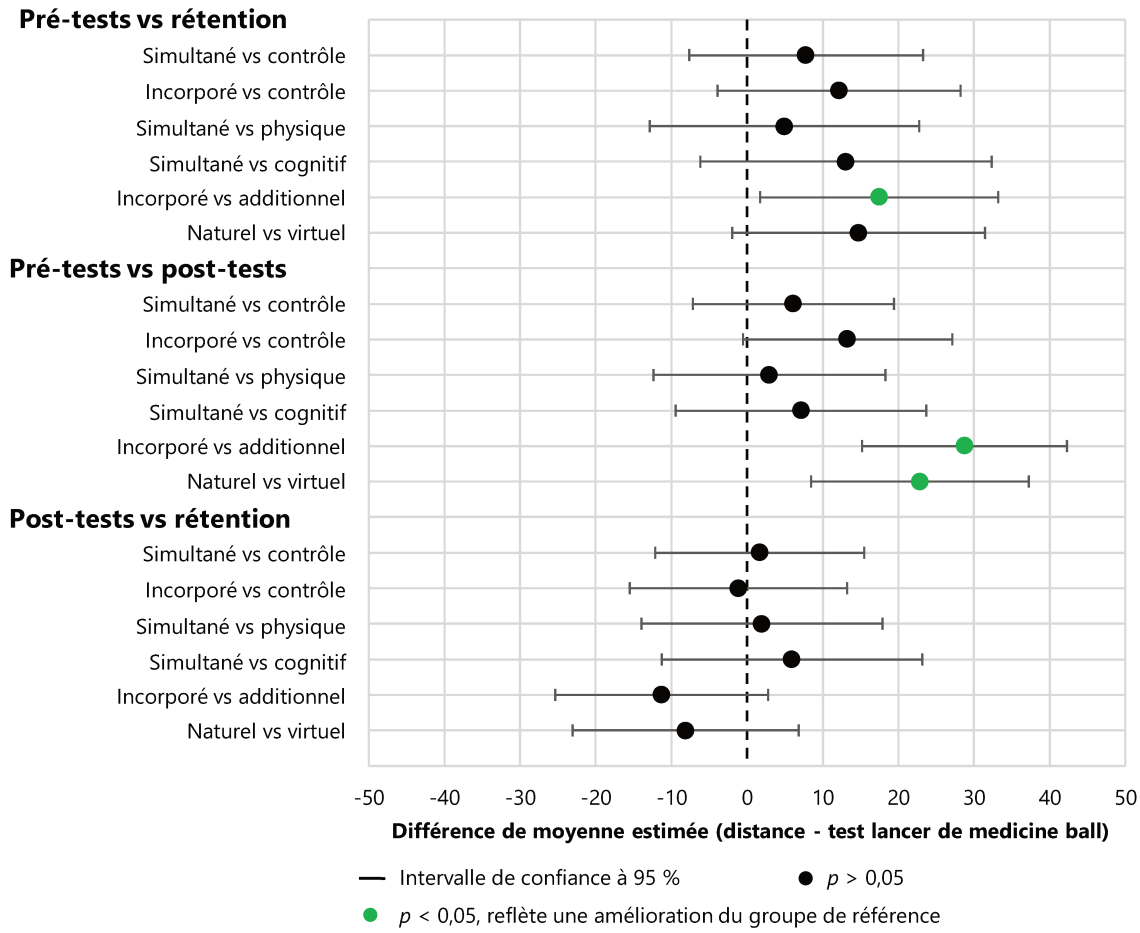


Figure 48. Différences d'évolution au test de lancer de medicine ball en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle entre les pré-tests et les tests de rétention : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 8 unités qui correspond à une amélioration d'environ 8 cm supplémentaires au test de lancer de medicine ball pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % n'est pas entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement non significative.*

3.3.1.3. Coordination

Test de coordination. Un effet principal du *temps* est observé ($F(2, 200) = 66{,}24$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}07$). Les post hoc indiquent une amélioration significative entre les pré-tests et les post-tests ($t(100) = 9{,}76$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}67$), ainsi qu'entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(100) = 9{,}14$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}62$). Il y a également un effet principal du *groupe* ($F(6, 100) = 3{,}89$, $p = 0{,}002$, $\eta^2 = 0{,}15$). Les analyses post hoc référentes sont détaillées en Annexe 28. Il y a également une interaction significative *temps* × *groupe* ($F(12, 200) = 4{,}42$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$). Les post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests pour AM2C ($t(100) = 7{,}02$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}27$) et EM2I ($t(100) = 7{,}93$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}35$), et entre les pré-tests et les tests de rétention pour AM2C ($t(100) = 5{,}62$, $p < 0{,}001$,

d = 1,00) et EM2I (*t*(100) = 6,61, *p* < 0,001, *d* = 1,10). Alors qu'il n'y avait pas de différence significative en pré-tests, EM2I (*t*(100) = 3,96, *p* = 0,027, *d* = 1,38) et AM2C (*t*(100) = 3,96, *p* = 0,027, *d* = 1,43) présentent des scores plus élevés que SWITCH en post-tests, mais également en test de rétention [(comparaison avec EM2I (*t*(100) = 3,97, *p* = 0,027, *d* = 1,38) et AM2C (*t*(100) = 3,90, *p* = 0,033, *d* = 1,40)].

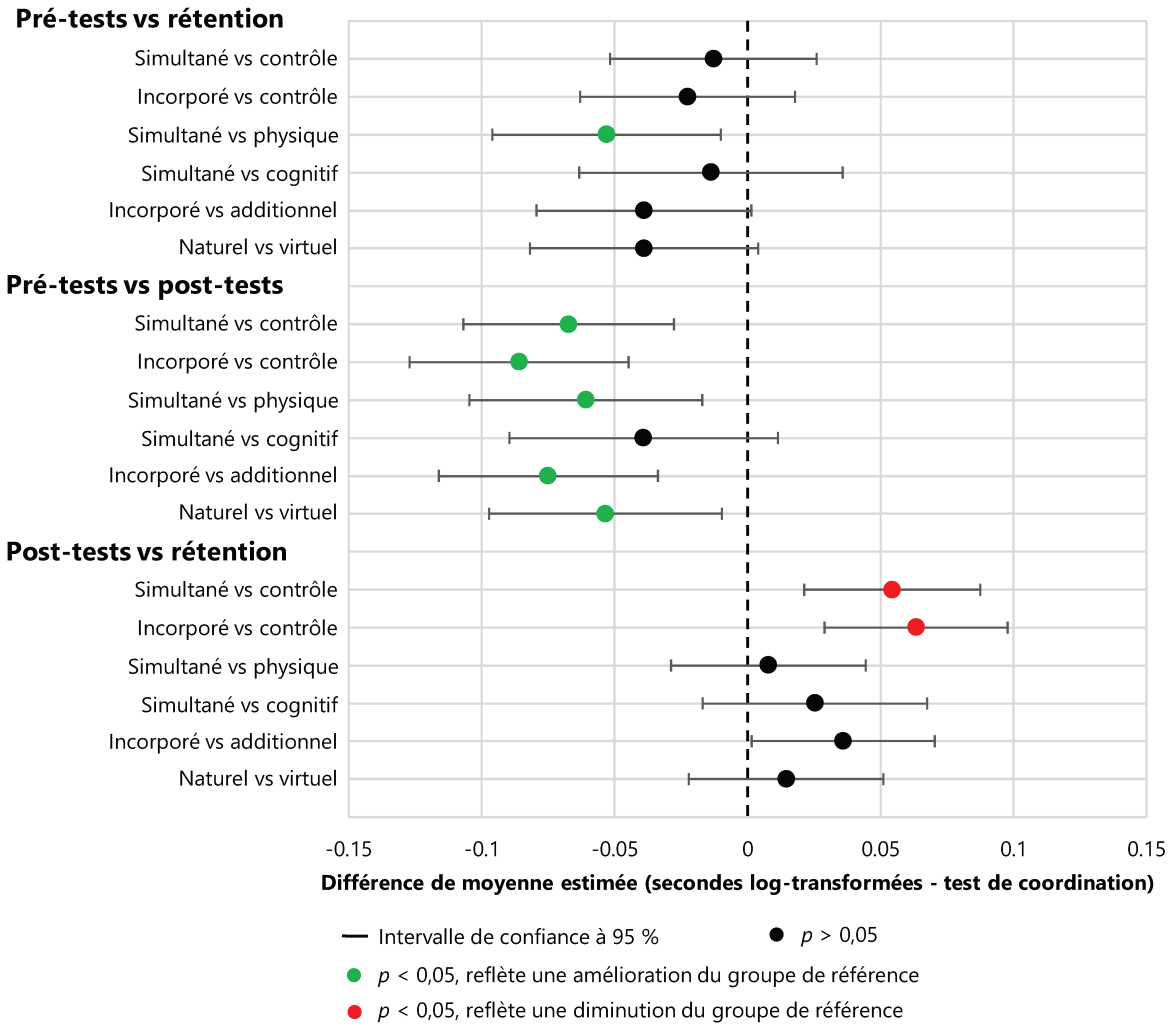


Figure 49. Différences d'évolution au test de coordination en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée sur des données log-transformées. Une valeur négative reflète une amélioration de la performance par rapport au groupe de référence. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs physique entre les pré-tests et les post-tests : le contraste entre les groupes simultané et physique révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,05 unités qui correspond à une amélioration relative d'environ 5 % supplémentaires au test de coordination pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement négatif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 49) indiquent que la coordination s'améliore significativement entre les pré-tests et les post-tests pour l'entraînement simultané ($t(100) = 3,37$, $p = 0,001$, $d = 0,63$) et incorporé ($t(100) = 4,14$, $p < 0,001$, $d = 0,81$) en comparaison au groupe contrôle. De plus, l'entraînement simultané s'avère plus efficace que l'entraînement physique seul ($t(100) = 2,76$, $p = 0,007$, $d = 0,57$), l'incorporé surpasse l'additionnel ($t(100) = 3,61$, $p < 0,001$, $d = 0,70$), et l'entraînement simultané naturel est plus efficace que l'entraînement simultané virtuel ($t(100) = 2,42$, $p = 0,017$, $d = 0,50$). Entre les post-tests et les tests de rétention, une diminution des performances est observée pour les entraînements simultané et incorporé en comparaison au groupe contrôle. Un effet similaire est observé pour l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel. Parmi l'ensemble des contrastes, un seul reste significatif entre les pré-tests et les tests de rétention : l'entraînement simultané demeure plus efficace que l'entraînement physique seul ($t(100) = 2,45$, $p = 0,016$, $d = 0,50$). Il y a également une tendance significative pour l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel ($t(100) = 1,91$, $p = 0,059$, $d = 0,37$).

3.3.2. Fonctions cognitives

Les scores obtenus aux pré-tests, aux post-tests et aux tests de rétention pour les capacités cognitives ainsi que les résultats des ANOVA et des analyses post hoc sont présentés dans le Tableau 25. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour deux scores : score inhibition, TMT B. Afin de corriger cette hétérogénéité, une transformation logarithmique a été appliquée à ces variables. Malgré cette correction, les variances demeurent inégales pour le score d'inhibition.

3.3.2.1. Temps de réaction

Temps de réaction à 2 choix. Un effet principal du *temps* est observé ($F(2, 202) = 7,58$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,02$). Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 3,73$, $p < 0,001$, $d = 0,29$), mais celle-ci ne se maintient pas, puisqu'il n'y a pas de différence significative entre les pré-tests et les tests de rétention, et qu'il y a une diminution significative entre les post-tests et les tests de rétention ($t(101) = 3,36$, $p = 0,002$, $d = 0,28$). De plus, il y a une interaction significative *temps* × *groupe* ($F(12, 202) = 4,95$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,06$). Les analyses post hoc révèlent des améliorations significatives entre les pré-tests et les post-tests pour les groupes EM2I ($t(101) = 4,12$, $p = 0,016$, $d = 0,78$) et SWITCH ($t(101) = 5,85$, $p < 0,001$, $d = 1,18$). Cependant, pour ces deux groupes, il n'y a pas de différence significative entre les pré-tests et les tests de rétention. De plus, une régression est notée entre les post-tests et les tests de rétention pour SWITCH ($t(101) = 6,88$, $p < 0,001$, $d = 1,45$).

Tableau 25. Résultats aux tests cognitifs en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5)

	Effets ANOVA		AM2C	EM2I	SWITCH	VÉLO-JV	VÉLO	JV	GC
			Moyenne (ET)	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*
Temps de réaction									
2 choix (ms)	**Temps*** **	Pré-tests	1908,67 (104,52)	1928,08 (68,85)	1962,91 (86,18)	1919,92 (65,66)	1935,25 (49,12)	1921,30 (57,12)	1946,65 (64,87)
	Groupe	Post-tests	1933,57 (79,32)	1873,72 (73,75)[a]	1880,97 (53,31)[a]	1937,11 (54,96)	1929,82 (49,70)	1908,35 (55,40)	1916,12 (73,46)
	Interaction* **	Rétention	1911,30 (88,64)	1893,06 (48,99)	1981,47 (93,29)[ccc]	1943,22 (61,41)	1934,68 (66,35)	1917,00 (59,76)	1933,38 (61,86)
Inhibition									
Score inhibition (ms)	**Temps*** **	Pré-tests	1349,90 (451,51)	1183,47 (211,71)	1248,53 (311,63)	1336,06 (561,43)	1225,29 (251,51)	1527,70 (632,70)	1142,71 (194,59)
	Groupe	Post-tests	1294,60 (462,12)	1162,83 (224,56)	1142,25 (249,76)	1332,75 (378,09)	1211,21 (304,90)	1082,00 (347,15)	1138,82 (234,35)
	Interaction	Rétention	1156,27 (295,61)	1147,97 (298,3)	1282,16 (420,21)	1161,25 (280,96)	1091,71 (289,73)	985,20 (284,58)	1077,26 (212,92)
Go/No-Go. *Temps - Moyenne (ms)*	Temps	Pré-tests	488,33 (91,60)	460,78 (76,22)	483,00 (79,40)	446,78 (67,67)	457,43 (62,60)	498,70 (59,78)	461,67 (55,49)
	Groupe	Post-tests	505,07 (73,47)	460,78 (81,31)	485,19 (85,10)	449,83 (79,60)	459,86 (55,03)	477,50 (56,99)	448,39 (54,18)
	Interaction	Rétention	499,80 (71,95)	446,50 (57,90)	489,37 (69,08)	464,50 (69,35)	465,36 (74,89)	491,10 (103,33)	472,50 (68,35)
Go/No-Go. *Temps - écart-type (ms)*	Temps	Pré-tests	90,33 (27,25)	76,72 (19,95)	79,94 (23,39)	76,61 (26,88)	88,43 (17,99)	85,80 (32,97)	74,17 (24,92)
	Groupe	Post-tests	80,40 (27,90)	80,72 (24,48)	93,00 (28,79)	71,06 (23,56)	79,71 (23,88)	60,80 (22,36)	70,67 (26,06)
	Interaction	Rétention	83,33 (20,22)	78,33 (16,33)	86,25 (14,24)	76,56 (35,19)	78,93 (24,35)	71,60 (27,49)	73,89 (18,35)
Go/No-Go. *Temps - erreurs (n)*	**Temps****	Pré-tests	1,73 (1,94)	1,89 (2,99)	2,25 (4,19)	2,00 (2,72)	1,29 (2,20)	1,30 (1,77)	1,50 (1,72)
	Groupe	Post-tests	0,87 (1,06)	1,72 (2,72)	2,31 (3,50)	0,94 (1,06)	1,64 (1,65)	0,50 (1,27)	0,50 (1,20)
	Interaction	Rétention	1,27 (2,63)	1,33 (2,00)	2,19 (1,76)	0,33 (0,59)	0,86 (1,17)	0,40 (0,70)	0,28 (0,46)
Flexibilité cognitive									
TMT B (s)	**Temps****	Pré-tests	75,44 (69,30)	70,72 (39,31)	92,65 (43,52)	78,77 (38,77)	57,99 (15,37)	49,72 (12,61)	57,38 (30,26)
	Groupe***	Post-tests	59,23 (25,95)	59,04 (32,49)	92,82 (56,25)	73,52 (39,29)	56,94 (19,97)	44,37 (18,60)	78,30 (33,08)[aa]
	Interaction***	Rétention	66,28 (43,59)	62,76 (30,59)	100,13 (89,71)	60,33 (25,79)	47,95 (16,87)	43,52 (17,38)	69,51 (35,11)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; JV : Jeux Vidéo ; GC : Groupe Contrôle ; ms : milliseconde ; s : seconde ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; TMT : Trail Making Test ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*
Une diminution des scores aux temps de réaction, à l'inhibition et à la flexibilité cognitive représente une amélioration de la performance
*Pour les effets sur les ANOVA, * : p < 0,05 ; ** : p < 0,01 ; *** : p < 0,001. Code lettres (a, b, c) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : a (pré-tests vs post-tests), b (post-tests vs tests de rétention), c (pré-tests vs tests de rétention). Code couleurs (rouge, vert) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : vert (amélioration), rouge (diminution). Code nombre de lettres (a, aa, aaa) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : a (p < 0,05), aa (p < 0,01), aaa (p < 0,001). Exemple de lecture : a au niveau du score post-tests pour le groupe EM2I signifie qu'il y a une amélioration significative à p < 0,05 entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe EM2I au temps de réaction à deux choix.*

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 50) indiquent que l'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 3{,}51$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}78$). Toutefois, aucune différence significative n'est observée entre les pré-tests et les tests de rétention, suggérant une absence de maintien de cet effet. L'entraînement simultané virtuel entraîne une amélioration plus importante que l'entraînement simultané naturel entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 3{,}93$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}93$). Cependant, cet avantage ne perdure pas : une régression est observée entre les post-tests et les tests de rétention ($t(101) = 3{,}75$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}92$), et les contrastes entre pré-tests et tests de rétention ne sont pas significatifs.

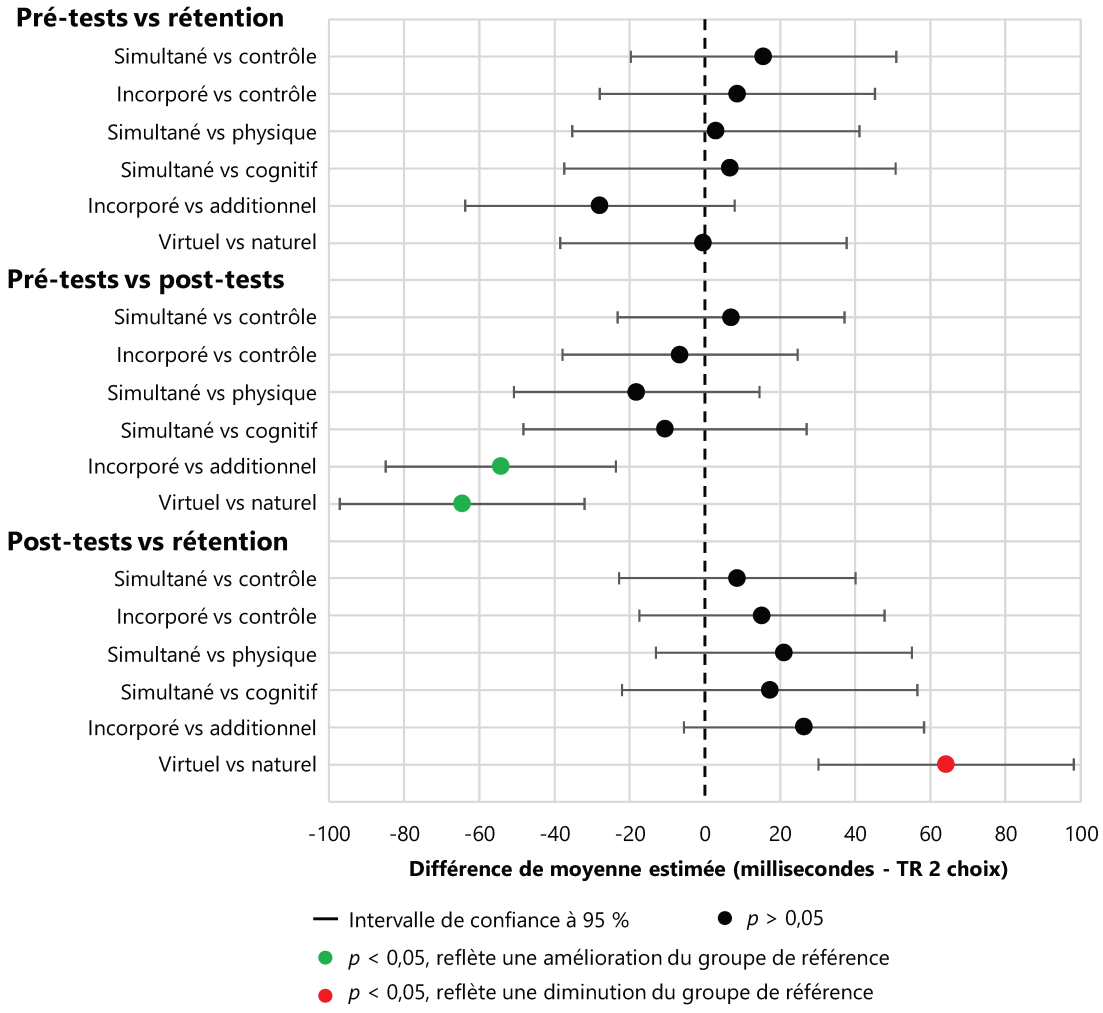


Figure 50. Différences d'évolution au Temps de réaction à 2 choix en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Une valeur négative reflète une amélioration de la performance par rapport au groupe de référence. Exemple de lecture pour le contraste incorporé vs additionnel entre les pré-tests et les post-tests : le contraste entre les groupes incorporé et additionnel révèle une différence de moyenne estimée d'environ 55 unités qui correspond à une amélioration de 55 ms supplémentaires au test TR 2 choix pour le groupe incorporé par rapport au groupe additionnel. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement négatif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.3.2.2. Inhibition

Score d'inhibition. Un effet principal du *temps* est observé ($F(2, 202) = 9{,}40$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$). Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 2{,}66$, $p = 0{,}018$, $d = 0{,}25$), ainsi qu'entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(101) = 4{,}20$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}46$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 51) montrent que l'entraînement cognitif seul est plus efficace que l'entraînement simultané entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 3{,}03$, $p = 0{,}003$, $d = 0{,}98$), et cette différence se maintient entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(101) = 3{,}02$, $p = 0{,}003$, $d = 1{,}15$).

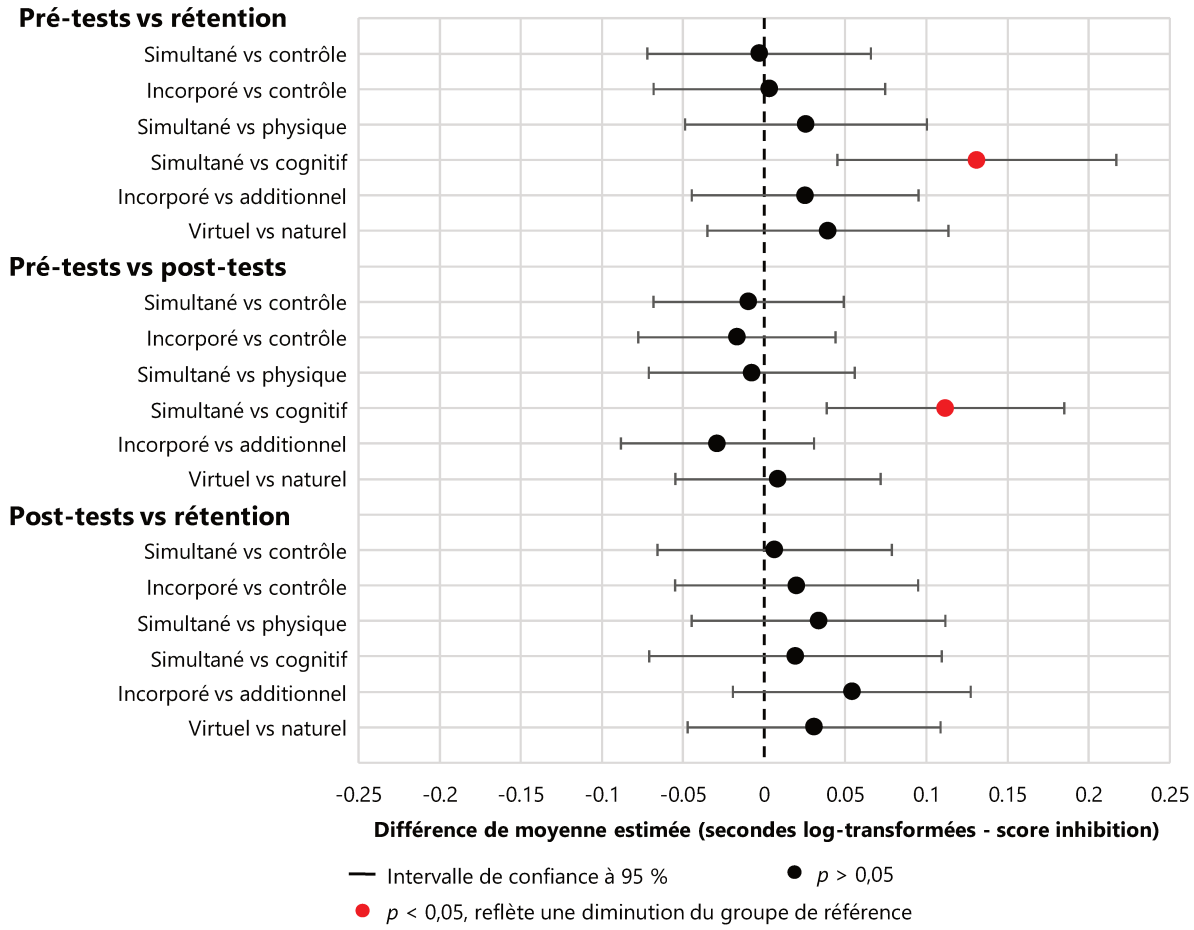


Figure 51. Différences d'évolution au score d'inhibition en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée sur des données log-transformées. Une valeur négative reflète une amélioration de la performance par rapport au groupe de référence. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs cognitif entre les pré-tests et les tests de rétention : le contraste entre les groupes simultané et cognitif révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,13 unités qui correspond à une amélioration relative d'environ 13 % supplémentaires au score d'inhibition pour le groupe cognitif par rapport au groupe simultané. L'intervalle de confiance à 95 est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Go/No-Go (Temps – moyenne). Il n'y a pas de différence significative (ANOVA). Les contrastes ne sont pas significatifs.

Go/No-Go (Temps – écart-type). Il n'y a pas de différence significative (ANOVA).

Contrastes. Les contrastes planifiés indiquent que l'entraînement cognitif est plus efficace que l'entraînement simultané entre les pré-tests et les post-tests ($t(102) = 2,94$, $p = 0,004$, $d = 1,04$). Toutefois, cet avantage ne se maintient pas puisqu'il n'y a pas de différence significative entre les pré-tests et les tests de rétention.

Go/No-Go (Temps – erreurs). Un effet principal du *temps* est observé ($F(2, 204) = 6,09$, $p = 0,003$, $\eta^2 = 0,02$). Il y a une différence entre les pré-tests et les post-tests ($t(102) = 2,31$, $p = 0,045$, $d = 0,23$) et entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(102) = 3,11$, $p = 0,007$, $d = 0,35$).

Contrastes. Il y a une tendance significative entre les pré-tests et les tests de rétention en faveur de l'entraînement additionnel comparativement à l'entraînement incorporé ($t(102) = 1,91$, $p = 0,06$, $d = 0,61$).

3.3.2.3. Flexibilité cognitive

TMT B. Un effet principal du *temps* ($F(2, 202) = 6,06$, $p = 0,003$, $\eta^2 = 0,01$) est observé. Les analyses post hoc indiquent une amélioration entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(101) = 3,22$, $p = 0,005$, $\eta^2 = 0,40$). Il y a également un effet d'interaction *temps* × *groupe* ($F(12, 202) = 3,42$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,03$). Les analyses post hoc révèlent une diminution pour le groupe contrôle entre les pré-tests et les post-tests ($t(101) = 4,19$, $p = 0,012$, $d = 1,19$). Alors qu'il n'y avait pas de différence en pré-tests, AM2C présente un meilleur temps que GC en post-tests ($t(101) = 4,20$, $p = 0,012$, $d = 1,76$), ainsi que par rapport à JV ($t(101) = 4,36$, $p = 0,007$, $d = 2,04$) et EM2I ($t(101) = 4,88$, $p < 0,001$, $d = 1,95$). Enfin, un effet du *groupe* ($F(6, 202) = 5,36$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,05$) est observé. Les analyses post hoc sont détaillées dans l'Annexe 28.

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 52) montrent qu'entre les pré-tests et les post-tests, les programmes incluant de l'entraînement simultané ($t(101) = 4,75$, $p < 0,001$, $d = 1,54$) et incorporé ($t(101) = 4,74$, $p < 0,001$, $d = 1,59$) sont plus efficaces que le groupe contrôle. Ces améliorations des entraînements simultané ($t(101) = 2,90$, $p = 0,005$, $d = 1,00$) et incorporé ($t(101) = 2,38$, $p = 0,019$, $d = 0,85$) par rapport groupe contrôle se maintiennent entre les pré-tests et les tests de rétention, bien qu'une diminution soit observée pour l'entraînement incorporé entre les post-tests et les tests de

rétention, comparativement au groupe contrôle ($t(101) = 2,10$, $p = 0,038$, $d = 0,74$) et à l'additionnel ($t(101) = 2,31$, $p = 0,023$, $d = 0,80$).

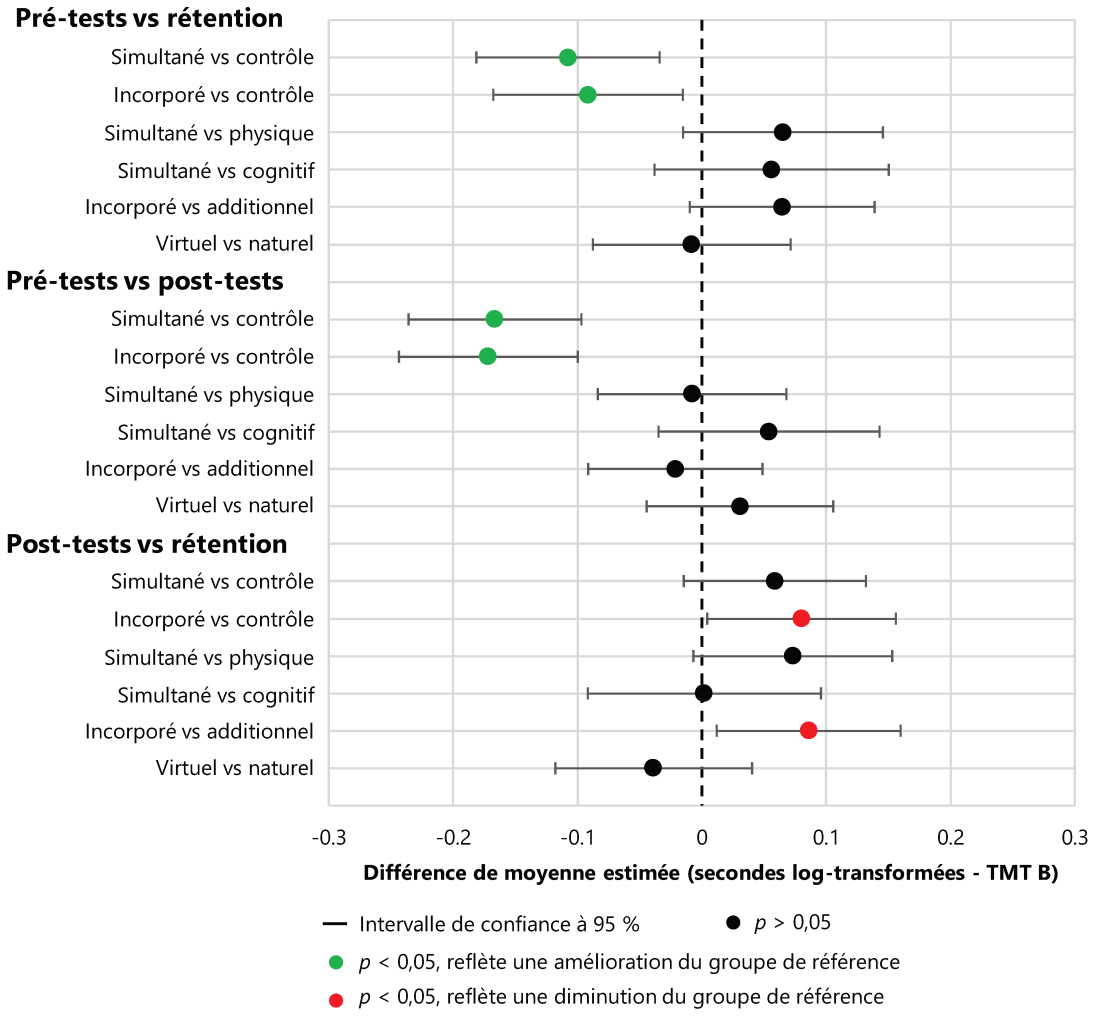


Figure 52. Différences d'évolution au score TMT B en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée sur des données log-transformées. Une valeur négative reflète une amélioration de la performance par rapport au groupe de référence. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle entre les pré-tests et les post-tests : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,10 unité qui correspond à une amélioration relative d'environ 10 % supplémentaires au temps TMT B pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement négatif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

3.3.3. Double-tâche cognitivo-cognitive

Les scores obtenus aux pré-tests, aux post-tests et aux tests de rétention en ST et DT, ainsi que les résultats des ANOVA sont indiqués dans le Tableau 26. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour deux scores : comptage sonore (ST, DT). Afin de corriger cette hétérogénéité, une

transformation logarithmique a été appliquée à ces variables. Malgré cette correction, les variances demeurent inégales pour le score comptage sonore ST.

3.3.3.1. Tâche cognitive 1 : tâche Go/No-Go

ST. Les résultats sont indiqués dans la partie 3.3.2.2.

DT. Il y a un effet du *temps* pour le nombre d'erreurs ($F(2, 204) = 15{,}41$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}04$) et le temps – écart-type ($F(2, 204) = 7{,}77$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}03$) mais non pour le temps – moyenne. Les analyses post hoc indiquent une amélioration pour le nombre d'erreurs entre les pré-tests et les post-tests ($t(102) = 3{,}57$, $p = 0{,}001$, $d = 0{,}36$) ainsi qu'entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(102) = 5{,}78$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}49$). Il y a également une amélioration pour le temps – écart-type entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(102) = 3{,}77$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}42$).

Contrastes. Le seul contraste significatif concerne la différence entre l'entraînement simultané nartuel et virtuel, entre les pré-tests et les tests de rétention pour le temps – moyenne ($t(102) = 2{,}24$, $p = 0{,}027$, $d = 0{,}60$).

3.3.3.2. Tâche cognitive 2 : tâche de comptage sonore

ST. Il n'y a aucune différence significative (ANOVA et contrastes planifiés).

DT. Il y a un effet du *temps* ($F(2, 202) = 3{,}17$, $p = 0{,}044$, $\eta^2 = 0{,}01$). Cependant, les analyses post hoc n'indiquent pas de différence significative.

Contrastes. Les contrastes planifiés indiquent que l'entraînement simultané est plus efficace que l'entraînement physique, entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(101) = 2{,}14$, $p = 0{,}035$, $d = 0{,}78$).

Tableau 26. Résultats aux tests de DT en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5)

			AM2C	EM2I	SWITCH	VÉLO-JV	VÉLO	JV	GC
	Effets ANOVA		*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*
Go/No-Go (ST)									
Go/No-Go. *Temps - Moyenne (ms)*	Temps	Pré-tests	488,33 (91,60)	460,78 (76,22)	483,00 (79,40)	446,78 (67,67)	457,43 (62,60)	498,70 (59,78)	461,67 (55,49)
	Groupe	Post-tests	505,07 (73,47)	460,78 (81,31)	485,19 (85,10)	449,83 (79,60)	459,86 (55,03)	477,50 (56,99)	448,39 (54,18)
	Interaction	Rétention	499,80 (71,95)	446,50 (57,90)	489,37 (69,08)	464,50 (69,35)	465,36 (74,89)	491,10 (103,33)	472,50 (68,35)
Go/No-Go. *Temps - écart-type (ms)*	Temps	Pré-tests	90,33 (27,25)	76,72 (19,95)	79,94 (23,39)	76,61 (26,88)	88,43 (17,99)	85,80 (32,97)	74,17 (24,92)
	Groupe	Post-tests	80,40 (27,90)	80,72 (24,48)	93,00 (28,79)	71,06 (23,56)	79,71 (23,88)	60,80 (22,36)	70,67 (26,06)
	Interaction	Rétention	83,33 (20,22)	78,33 (16,33)	86,25 (14,24)	76,56 (35,19)	78,93 (24,35)	71,60 (27,49)	73,89 (18,35)
Go/No-Go. *Temps – erreurs (n)*	**Temps****	Pré-tests	1,73 (1,94)	1,89 (2,99)	2,25 (4,19)	2,00 (2,72)	1,29 (2,20)	1,30 (1,77)	1,50 (1,72)
	Groupe	Post-tests	0,87 (1,06)	1,72 (2,72)	2,31 (3,50)	0,94 (1,06)	1,64 (1,65)	0,50 (1,27)	0,50 (1,20)
	Interaction	Rétention	1,27 (2,63)	1,33 (2,00)	2,19 (1,76)	0,33 (0,59)	0,86 (1,17)	0,40 (0,70)	0,28 (0,46)
Go/No-Go (DT)									
Go/No-Go. *Temps - Moyenne (ms)*	Temps	Pré-tests	590,53 (99,85)	564,83 (117,26)	601,31 (99,08)	596,17 (170,87)	604,71 (155,75)	557,60 (73,94)	559,94 (118,35)
	Groupe	Post-tests	602,67 (125,74)	549,39 (100,12)	594,37 (116,02)	550,83 (88,86)	585,21 (124,19)	559,70 (72,78)	541,39 (83,64)
	Interaction	Rétention	616,07 (117,81)	534,78 (78,00)	562,12 (94,97)	548,28 (95,42)	555,07 (75,80)	564,20 (69,96)	562,94 (96,43)
Go/No-Go. *Temps - écart-type (ms)*	**Temps*****	Pré-tests	146,87 (41,41)	169,83 (75,29)	169,94 (67,59)	169,39 (94,18)	162,00 (80,63)	145,70 (42,72)	139,06 (58,32)
	Groupe	Post-tests	147,20 (60,20)	147,94 (57,05)	160,19 (66,54)	131,39 (68,78)	154,00 (69,78)	131,10 (75,27)	124,22 (55,56)
	Interaction	Rétention	144,27 (56,49)	133,83 (48,93)	131,50 (57,04)	121,78 (63,33)	119,79 (39,91)	134,20 (69,22)	126,28 (75,33)
Go/No-Go. *Temps – erreurs (n)*	**Temps*****	Pré-tests	2,87 (3,02)	3,39 (3,63)	3,69 (3,26)	3,22 (2,41)	2,14 (1,88)	3,40 (3,47)	2,50 (2,53)
	Groupe	Post-tests	1,80 (1,57)	3,00 (2,52)	2,31 (1,85)	2,44 (2,12)	2,43 (4,03)	1,20 (1,99)	1,44 (2,01)
	Interaction	Rétention	1,73 (2,12)	2,50 (2,18)	2,13 (4,46)	1,67 (1,81)	1,79 (1,76)	1,20 (2,49)	1,22 (1,52)
Comptage sonore									
ST (n)	Temps	Pré-tests	0,20 (0,41)	0,78 (1,70)	0,50 (1,37)	1,28 (2,67)	1,14 (2,03)	1,10 (1,91)	1,06 (2,61)
	Groupe	Post-tests	0,40 (1,06)	0,56 (1,25)	0,56 (1,09)	1,61 (3,33)	1,00 (2,18)	0,20 (0,42)	0,59 (1,28)
	Interaction	Rétention	0,80 (1,01)	0,11 (0,32)	0,37 (0,81)	0,56 (1,04)	1,00 (1,57)	1,40 (3,27)	0,82 (2,40)
DT (n)	**Temps***	Pré-tests	5,00 (4,78)	4,78 (4,66)	5,56 (6,85)	4,06 (4,98)	1,93 (2,09)	2,20 (1,75)	2,76 (3,91)
	Groupe	Post-tests	2,40 (3,58)	3,00 (2,74)	4,19 (6,13)	4,00 (6,71)	2,36 (2,24)	1,60 (1,84)	2,00 (2,74)
	Interaction	Rétention	3,27 (3,99)	2,72 (2,91)	2,75 (3,71)	3,72 (4,14)	3,36 (3,97)	2,20 (3,61)	1,82 (1,55)

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; DT : Double-Tâche ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; JV : Jeux Vidéo ; GC : Groupe Contrôle ; ms : milliseconde ; ST : Simple-Tâche ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo. Une diminution des scores aux temps de réaction, à l'inhibition et à la flexibilité cognitive représente une amélioration de la performance. Pour les effets sur les ANOVA,* *******: $p < 0,05$;* ********: $p < 0,01$;* *********: $p < 0,001$.

3.3.4. Style de vie

Les scores obtenus en pré-tests, en post-tests et en tests de rétention pour le style de vie (questionnaire GLQ) ainsi que les résultats des ANOVA et des analyses post hoc sont présentés dans le Tableau 27. L'hypothèse d'homogénéité des variances a été violée pour le score total. Ainsi, une transformation logarithmique a été appliquée à cette variable, ainsi qu'à toutes les composantes du score total (même s'il n'y avait pas de violation d'homogénéité des variances, par souci d'homogénéité). Toutefois, les variances demeurent inégales pour le score total, les dimensions « activités physiques », « activités sociales » et « autres loisirs » malgré la transformation.

Score total GLQ. Il y a un effet principal du *temps* ($F(2, 184) = 3{,}18$, $p = 0{,}044$, $\eta^2 = 0{,}01$). Les analyses post hoc indiquent une augmentation du score entre les pré-tests et les tests de rétention ($t(92) = 2{,}47$, $p = 0{,}046$, $d = 0{,}19$). Il y a également un effet d'interaction *temps* x *groupe* ($F(12, 184) = 2{,}61$, $p = 0{,}003$, $\eta^2 = 0{,}04$). Les post hoc indiquent une augmentation significative entre les post-tests et les tests de rétention pour le GC ($t(92) = 3{,}91$, $p = 0{,}037$, $d = 0{,}82$).

Contrastes. Les contrastes planifiés (Figure 53) montrent qu'entre les pré-tests et les post-tests, les entraînements simultané ($t(92) = 4{,}08$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}04$) et incorporé ($t(92) = 3{,}84$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}02$) augmentent davantage leur score que le groupe contrôle. Ces deux mêmes comparaisons indiquent, entre les post-tests et les tests de rétention, une diminution des entraînements simultané ($t(92) = 4{,}26$, $p < 0{,}001$, $d = 1{,}00$) et incorporé ($t(92) = 3{,}87$, $p < 0{,}001$, $d = 0{,}95$) par rapport au groupe contrôle.

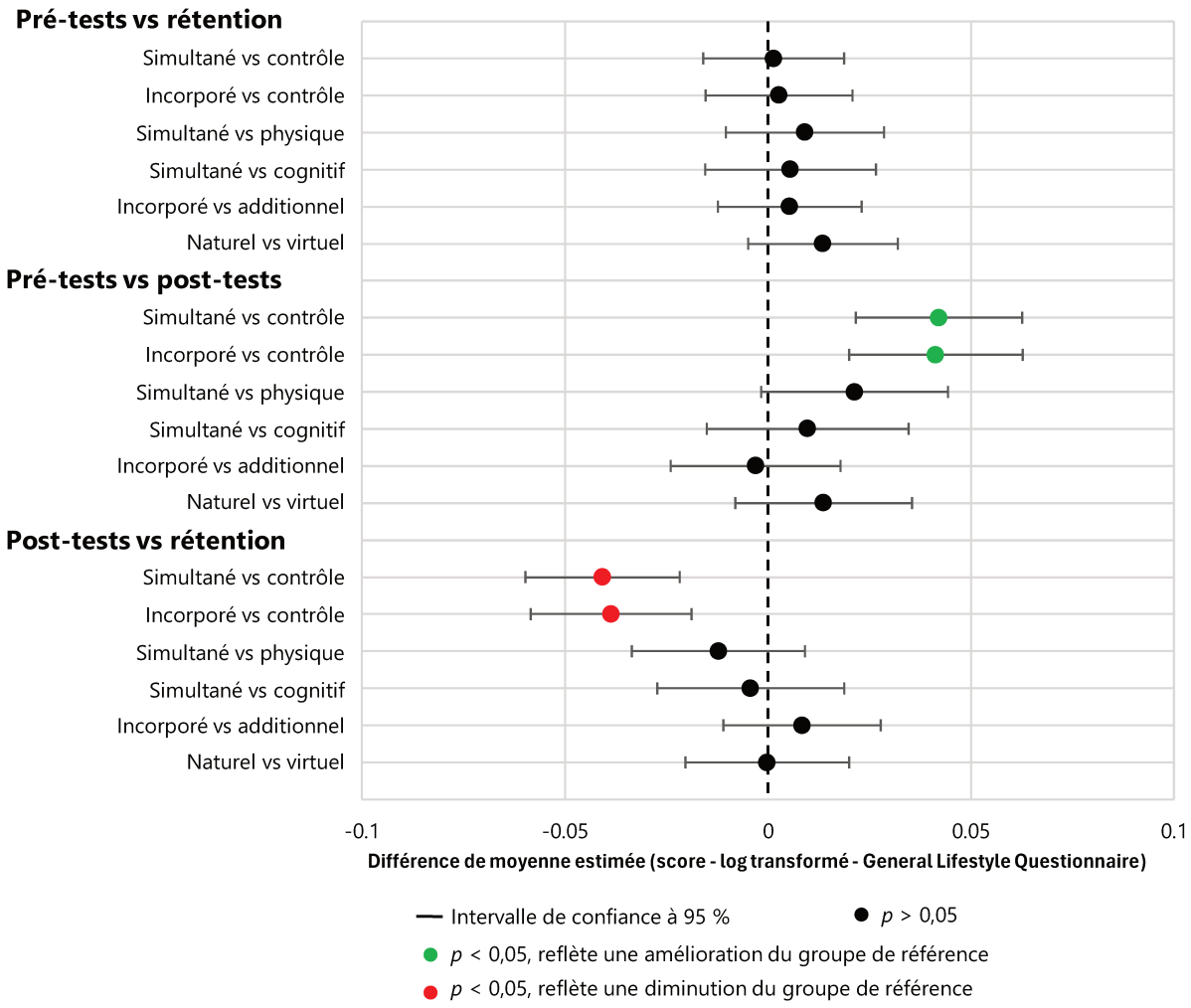


Figure 53. Différences d'évolution au score total du General Lifestyle Questionnaire en fonction des comparaisons expérimentales et des temps de mesure (étude 5)

Note. *Les valeurs sont exprimées en différences de moyenne estimée. Exemple de lecture pour le contraste simultané vs contrôle entre les pré-tests et les post-tests : le contraste entre les groupes simultané et contrôle révèle une différence de moyenne estimée d'environ 0,04 unité qui correspond à une amélioration d'environ 4 % supplémentaires au score total GLQ pour le groupe simultané par rapport au groupe contrôle. L'intervalle de confiance à 95 % est entièrement positif, reflétant que cette différence est statistiquement significative.*

Tableau 27. Résultats au General Lifestyle Questionnaire en pré-tests, post-tests et en rétention en fonction des groupes (étude 5)

			AM2C	EM2I	SWITCH	VÉLO-JV	VÉLO	JV	GC
	Effets ANOVA		*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*	*Moyenne (ET)*
Activités cognitives (n)	**Temps*** **	Pré-tests	3,21 (0,72)	3,39 (0,50)	2,88 (0,38)	3,15 (0,41)	3,16 (0,43)	3,26 (0,60)	3,23 (0,49)
	Groupe	Post-tests	3,19 (0,57)	3,51 (0,49)	3,33 (0,30)[a]	3,54 (0,43)[a]	3,11 (0,34)	3,52 (0,49)	3,27 (0,51)
	Interaction**	Rétention	3,23 (0,57)	3,44 (0,47)	2,96 (0,46)[b]	3,24 (0,44)	3,07 (0,46)	3,44 (0,55)	3,29 (0,36)
Activités physiques (n)	**Temps*** **	Pré-tests	3,04 (0,43)	2,89 (0,57)	2,58 (0,54)	2,99 (0,34)	2,93 (0,30)	3,10 (0,41)	2,69 (0,40)
	Groupe	Post-tests	3,36 (0,39)	3,29 (0,45)[a]	3,16 (0,39)[aa]	3,24 (0,23)	3,09 (0,37)	3,17 (0,37)	2,91 (0,66)
	Interaction**	Rétention	2,86 (0,42)[b]	2,95 (0,33)	3,07 (0,47)	2,97 (0,34)	3,09 (0,46)	3,03 (0,65)	2,94 (0,53)
Activités sociales (n)	**Temps****	Pré-tests	2,79 (0,54)	2,92 (0,48)	2,77 (0,46)	3,06 (0,39)	2,82 (0,47)	2,93 (0,28)	2,84 (0,53)
	Groupe	Post-tests	2,73 (0,41)	3,05 (0,34)	2,86 (0,53)	3,18 (0,41)	2,96 (0,41)	3,05 (0,24)	3,07 (0,42)
	Interaction	Rétention	2,77 (0,30)	2,99 (0,45)	2,88 (0,36)	3,00 (0,43)	2,87 (0,39)	3,08 (0,32)	2,88 (0,53)
Autres activités de loisirs (n)	**Temps****	Pré-tests	3,31 (0,50)	3,31 (0,43)	3,11 (0,34)	3,34 (0,61)	3,41 (0,54)	3,10 (0,52)	3,30 (0,52)
	Groupe	Post-tests	3,33 (0,25)	3,37 (0,52)	2,86 (0,53)	3,18 (0,41)	2,96 (0,41)	3,05 (0,24)	2,96 (0,52)
	Interaction	Rétention	3,43 (0,47)	3,38 (0,60)	3,26 (0,51)	3,37 (0,57)	3,28 (0,54)	3,05 (0,22)	3,30 (0,56)
Autres comportements de santé (n)	Temps	Pré-tests	3,83 (0,32)	3,85 (0,34)	3,94 (0,40)	3,79 (0,39)	3,70 (0,34)	3,65 (0,38)	3,85 (0,32)
	Groupe	Post-tests	3,79 (0,31)	3,79 (0,37)	4,03 (0,26)	3,86 (0,29)	3,76 (0,31)	3,55 (0,30)	3,55 (0,63)
	Interaction	Rétention	3,87 (0,37)	3,87 (0,45)	4,03 (0,30)	3,92 (0,49)	3,83 (0,36)	3,62 (0,30)	3,83 (0,34)
Score total (n)	**Temps***	Pré-tests	3,24 (0,37)	3,27 (0,30)	3,06 (0,26)	3,27 (0,29)	3,20 (0,20)	3,21 (0,25)	3,18 (0,31)
	Groupe	Post-tests	3,28 (0,25)	3,40 (0,30)	3,25 (0,23)	3,40 (0,28)	3,18 (0,18)	3,27 (0,25)	3,04 (0,51)
	Interaction**	Rétention	3,23 (0,30)	3,34 (0,29)	3,24 (0,26)	3,30 (0,29)	3,23 (0,25)	3,24 (0,25)	3,24 (0,29)[b]

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; ET : Écart-Type ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; n : nombre ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo. Pour les effets sur les ANOVA,* ***** *: p < 0,05 ;* ****** *: p < 0,01 ;* ******* *: p < 0,001. Code lettres (a, b, c) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : a (pré-tests vs post-tests), b (post-tests vs tests de rétention), c (pré-tests vs tests de rétention). Code couleurs (rouge, vert) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : vert (amélioration), rouge (diminution). Code nombre de lettres (a, aa, aaa) : indique les différences significatives en post hoc, sur le groupe : a (p < 0,05), aa (p < 0,01), aaa (p < 0,001). Exemple de lecture : il y a une amélioration significative à p < 0,05 entre les pré-tests et les post-tests pour le groupe SWITCH au score « activités cognitives ».*

4. DISCUSSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer les effets de rétention des programmes simultanés par rapport au groupe contrôle et aux entraînements centrés sur une composante (physique ou cognitive). Les mêmes modalités (incorporée vs contrôle, incorporée vs additionnelle, virtuelle vs naturelle) étaient également questionnées. Pour l'étude 4, il a été choisi de conserver l'ensemble de l'échantillon total des participants ayant réalisé les pré-tests et les post-tests afin de garder une puissance statistique élevée. En revanche, l'étude 5 intègre uniquement les participants ayant réalisé les trois temps de mesure (i.e., pré-tests, post-tests, rétention). Cela représente une perte de 29 sujets, soit 21 % de l'échantillon de l'étude 4, avec un impact sur certains groupes présentant un faible échantillon (e.g., n = 10 pour JV, n = 14 pour VÉLO). Des analyses similaires à l'étude 4 ont été conduites (ANOVA à mesures répétées complétées par des contrastes planifiés) avec ici, 3 temps de mesure. Toutefois, la réduction de l'échantillon dans l'étude 5 a eu un impact sur les résultats observés entre les pré-tests et post-tests : certains effets au niveau des groupes et des contrastes ne sont pas similaires à ceux retrouvés dans l'étude 4. Afin de garantir, dans cette thèse, la cohérence des analyses entre les deux études, ne sont conservées en étude 5 uniquement les variables pour lesquelles les effets observés entre les pré-tests et post-tests sont similaires à ceux de l'étude 4. En conséquence, trois scores physiques et moteurs (TUG, TM6, Handgrip), quatre scores cognitifs (TR 8 inhibition, empan simple, empan inverse, TMT B-A) ainsi qu'un de DT (DT cognitivo-motrice) n'ont pas été retenus pour l'analyse des effets de rétention. Celle-ci est donc effectuée sur cinq scores physiques et moteurs (30 secondes assis-debout, lancer de medicine ball, test de coordination, gratte-dos, *sit-and-reach test*), sept scores cognitifs (TR 2 choix, TR 8 choix, score inhibition, Go/No-Go – Temps (moyenne), Go/No-Go – Temps (écart-type), Go/No-Go – Erreurs, TMT B) et les quatre composantes de la DT cognitivo-cognitive (ST tâches cognitives 1 et 2, DT tâches cognitives 1 et 2).

4.1. Effets physiques et moteurs des entraînements

Au niveau physique et moteur, les résultats indiquent l'absence de maintien des trois capacités qui s'étaient améliorées à la suite de l'entraînement simultané (force du bas du corps, force du haut du corps, coordination), et l'absence d'effet retardé sur la souplesse. Plus particulièrement, l'entraînement simultané qui était plus efficace que les entraînements physique et cognitif pour améliorer la force du bas du corps juste après l'entraînement, ne l'est plus 3 mois après. En revanche, au niveau de la coordination, les bénéfices à court terme de l'entraînement simultané par rapport à l'entraînement physique se maintiennent en rétention. Pour la force du haut du corps, l'entraînement simultané n'est pas plus efficace à court terme ni en rétention que les entraînements physique et cognitif. Ainsi,

l'entraînement simultané se révèle uniquement plus efficace que l'entraînement physique pour améliorer la coordination à moyen terme. Cependant, il est nécessaire de souligner qu'aucune différence significative n'est rapportée entre l'entraînement simultané et le groupe contrôle sur la coordination.

Ainsi, ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de la méta-analyse de Rieker et al. (2022) indiquant que l'entraînement combiné, comparativement au groupe contrôle présente des bénéfices entre les pré-tests et les tests de rétention. Certaines études, comme celle d'Oswald et al. (2006), rapportent toutefois des résultats contradictoires. Après la phase d'entraînement, uniquement le groupe combiné (et non le groupe d'entraînement physique) s'est amélioré par rapport au groupe contrôle, mais ces effets ne se maintiennent pas à long terme (Oswald et al., 2006). Ces deux travaux utilisent des scores composites pour leurs analyses, intégrant des mesures variées (coordination, souplesse, rythme, adaptation face à un objet en mouvement, endurance, force pour Oswald et al., 2006 ; condition physique, équilibre et force pour Rieker et al., 2022), potentiellement à l'origine de la divergence des résultats. Concernant les capacités spécifiquement évaluées dans cette thèse, notamment la force du bas du corps, l'étude de Laatar et al. (2018) l'évalue également avec le 30 secondes assis-debout. Elle compare les effets d'un entraînement (6 mois, 3 séances d'une heure par semaine) combiné (tâches physiques similaires à l'entraînement physique, couplées à diverses tâches cognitives additionnelles comme des tâches de décompte ou de fluence verbale) à un entraînement physique (force, équilibre), avec une rétention 6 mois après la fin du programme. Les résultats indiquent un maintien des bénéfices initialement observés à court terme. Cependant, cet effet reflète un transfert proche au niveau du contenu et des modalités d'évaluation, puisque cet exercice était réalisé régulièrement pendant les entraînements. De plus, l'entraînement est plus long (6 mois) et plus fréquent (3 séances par semaine) que celui de la présente étude.

Concernant la force du haut du corps, l'étude de Romera-Liebana (2018) indique des bénéfices d'un entraînement combinant plusieurs modalités (entraînement physique aérobie : 2 séances d'une heure par semaine ; entraînement de la mémoire : 2 séances d'une heure par semaine ; consommation de boissons nutritionnelles hyperprotéinées et révision de la médication) qui se maintiennent 15 mois après. Les résultats témoignent d'un transfert éloigné, d'une part parce que l'entraînement physique ne ciblait pas spécifiquement la force musculaire, et d'autre part parce que les auteurs ont eu recours à un test non pratiqué lors de l'entraînement : le test du *Handgrip*. Ce test, utilisé également dans cette thèse, n'avait pas montré d'effet de l'entraînement en étude 4, et n'a pas été conservé en étude 5 étant donné la divergence des résultats retrouvés avec l'étude 4 entre les pré-tests et les post-tests.

Ces premiers résultats sur l'entraînement combiné indiquent que le maintien des bénéfices de l'entraînement peut être spécifique à la proximité de l'entraînement et de la tâche d'évaluation (Laatar et al., 2018) mais se traduit également par des transferts plus éloignés (Romera-Liebana et al., 2018). Nos résultats ne corroborent toutefois pas cette observation, en particulier en ce qui concerne le transfert éloigné. Cette divergence peut s'expliquer par un niveau de départ élevé de nos participants, comparativement aux deux études précédemment citées. Au test 30 secondes assis-debout, les scores en pré-tests étaient compris entre 11,40 et 15,07 répétitions, contre 10,66 à 11 répétitions dans l'étude de Laatar et al. (2018). Pour le test de préhension manuelle (Handgrip), nos participants obtenaient entre 21,10 kg et 24 kg selon les groupes (étude 4), tandis qu'ils atteignaient seulement 16,5 kg dans l'étude de Romera-Liebana (2018). Il est donc possible que les individus ayant un niveau initial plus faible présentent des gains plus importants, lesquels tendent à diminuer mais dont au moins une partie se maintient, contrairement aux participants ayant déjà un bon niveau initial qui progressent à l'entraînement dans une moindre mesure. La réversibilité de l'entraînement pourrait ainsi être dépendre du niveau de départ et du taux de progression des participants. Concernant la coordination, il n'existe pas d'étude à notre connaissance questionnant les effets de rétention de l'entraînement combiné spécifiquement sur cette fonction.

Au regard des résultats de cette étude, les modalités d'entraînement (incorporée vs additionnelle) et les groupes peuvent être considérés comme des facteurs influençant les effets de rétention. En effet, l'entraînement incorporé, comparé à l'additionnel, maintient ses bénéfices, bien que les tailles d'effet soient plus faibles en rétention qu'immédiatement après l'entraînement (force du bas du corps, d = 0,80 à d = 0,48 ; force du haut du corps, d = 0,47 à d = 0,19 ; coordination, d = 0,70 à d = 0,37[1]), traduisant un effet plus faible en rétention. Ainsi, l'entraînement incorporé, qui était déjà plus efficace à court terme que l'additionnel, l'est toujours en rétention, dans une moindre mesure. Au niveau des groupes, AM2C maintient l'amélioration de 2 des 3 capacités physiques (force du bas du corps, coordination), EM2I maintient la coordination mais non la force du bas du corps (pas d'amélioration du haut du corps) et SWITCH ne maintient pas la force du bas du corps (pas d'amélioration des deux autres capacités à court terme). Ainsi, le programme AM2C semble être le plus efficace pour conserver les capacités physiques et motrices améliorées après l'entraînement.

[1] Il y a une tendance significative (p = 0,059) pour la comparaison de l'entraînement incorporé et additionnel entre les pré-tests et les tests de rétention.

4.2. Effets cognitifs et en DT

Au niveau cognitif, les résultats montrent un maintien en rétention des effets observés à court terme. Concernant la flexibilité cognitive, les effets à court terme de l'entraînement simultané et incorporé sont maintenus en rétention, de manière similaire aux entraînements physique et cognitif et entre l'entraînement incorporé et additionnel. En revanche, ces effets sont plus faibles entre les pré-tests et les tests de rétention, qu'entre les pré-tests et les post-tests, et une diminution significative est même observée entre les post-tests et les tests de rétention. Ainsi, de forts bénéfices à la suite de l'entraînement ont permis de conserver un niveau plus élevé qu'avant l'entraînement, malgré l'arrêt de celui-ci. Contrairement à l'étude d'Eggenberger et al. (2015), il n'est pas rapporté d'effet différé sur cette capacité cognitive. Une nouvelle fois, les scores de départ des participants de la présente étude sont largement plus faibles que ceux de l'étude d'Eggenberger et al. (2015) (en pré-tests, entre 49,72 secondes et 92,65 secondes dans notre étude au TMT B, contre entre environ 100 et 130 secondes[1] dans l'étude d'Eggenberger et al. (2015). Par ailleurs, les mesures répétées (4 mesures) d'Eggenberger et al. (2015), sans suivi des habitudes de vie et sans intégration de groupe contrôle, peuvent également être à l'origine de ces effets différés.

L'effet supérieur à court terme de l'entraînement cognitif par rapport à l'entraînement combiné sur l'inhibition est également maintenu à long terme, mais uniquement pour le *score d'inhibition*, et non pas sur la mesure d'écart-type au test Go/No-Go. À noter que l'effet élevé et similaire entre les pré-tests et les post-tests (d = 0,98) et entre les pré-tests et les tests de rétention (d = 1,15), traduit un bénéfice important de l'entraînement et une absence de diminution à l'arrêt de l'entraînement. En étude 4, nous avions émis l'hypothèse que l'inhibition avait été particulièrement sollicitée lors de l'entraînement cognitif, se traduisant par un transfert proche en termes de contenu (mais non de contexte). Ainsi, les transferts proches peuvent être plus marqués à long terme que les transferts éloignés, puisqu'ils pourraient reposer sur le déclenchement de routines bien entraînées, d'actions automatiques, dans un contexte présentant une forte similarité avec le contexte d'apprentissage (Perkins & Salomon, 1999). Par ailleurs, ces résultats sont novateurs puisqu'aucun résultat à notre connaissance ne montre d'effet supérieur de l'entraînement cognitif en rétention, par rapport à l'entraînement simultané, dans le champs du vieillissement.

[1] Les temps ne sont pas précis car ils sont extraits visuellement d'un graphique.

À court terme, le temps de réaction simple (TR 2) est amélioré pour l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel (mais non au groupe contrôle), cependant, ces différences ne se maintiennent pas lors de la phase de rétention. Cela est reflété au niveau des groupes par les améliorations à court terme d'EM2I et SWITCH, non maintenues en rétention. Concernant la DT cognitivo-cognitive, aucun effet retardé de l'entraînement n'est retrouvé.

4.3. Suivi du style de vie

Le suivi du style de vie des participants indique que, pendant les programmes, l'entraînement simultané et l'entraînement incorporé ont permis d'augmenter les scores par rapport au groupe contrôle, de manière similaire aux entraînements centrés sur une composante (physique, cognitive). Cela se traduit par une hausse du niveau d'activité physique et/ou de stimulation cognitive dans l'ensemble des groupes. Cependant, il est observé une diminution de ces scores entre les post-tests et les tests de rétention, de sorte qu'aucun effet significatif n'est retrouvé entre les pré-tests et les tests de rétention. Ces résultats suggèrent que l'absence ou le faible maintien des effets de l'entraînement s'expliquerait par le fait que les comportements acquis pendant les programmes n'ont pas été maintenus, et qu'aucun effet retardé n'apparaît puisque les participants n'ont pas continué à pratiquer. Cela pourrait expliquer la divergence entre nos résultats et certaines études montrant des bénéfices plus durables ou retardés. En effet, si les participants poursuivent les activités proposées après l'arrêt du programme, cela peut influencer la persistance des effets (e.g., Oswald et al., 2006) ou les effets retardés (e.g., Eggenberger et al., 2015) observés dans certaines études. À l'inverse, si ces activités ne sont pas ou très peu maintenues, comme c'est le cas dans notre étude, cela confirme le principe de réversibilité de l'entraînement : une fois le stimulus de l'entraînement supprimé, les niveaux de performance reviennent progressivement à leur niveau initial. Au niveau cognitif, cela représente le principe « *use it or lose it* » (« utilise-le ou perds-le ») (Hultsch et al., 1999). Selon cette approche explicative du vieillissement cognitif, le déclin des capacités résulterait d'un manque d'utilisation des systèmes cognitifs, entraînant une baisse progressive des performances (Marquié & Isingrini, 2001).

Ce questionnaire présente néanmoins plusieurs limites dans le cadre de cette étude. D'une part, les composantes physique et cognitive ne correspondent qu'à deux domaines au sein d'un score global composé de trois autres domaines (i.e., activités sociales, autres activités de loisirs, autres comportements de santé). Il aurait été pertinent de suivre séparément l'évolution de ces composantes à l'aide de questionnaires spécifiques, notamment le QAPPA pour le niveau d'activité physique, déjà utilisé en pré-tests. D'autre part, ce questionnaire évalue les comportements sur une période d'un an,

alors que cette étude compare des périodes de trois mois. Un questionnaire dédié à des périodes de trois mois, voire plus courtes (un mois), aurait été plus approprié.

La limite principale de cette étude concerne le faible échantillon de chaque groupe, qui n'a pas permis de refléter l'ensemble des résultats de l'étude 4. Ainsi, l'analyse des effets de rétention n'a pu être réalisée que sur 5 scores physiques (30 secondes assis-debout, lancer de medicine ball, test de coordination, *sit-and-reach test*, gratte-dos), 4 scores cognitifs [TR 2 choix, score inhibition, Go/No-Go (moyenne du temps, écart-type du temps, nombre d'erreurs), TMT B] et 1 score de DT (DT cognitivo-cognitive) afin de garantir la cohérence dans l'analyse et l'interprétation des résultats.

DISCUSSION GÉNÉRALE

« *Multiple roads lead to Rome* » (en français : plusieurs chemins mènent à Rome), indique le titre imagé de l'étude interventionnelle de Berryman et al. (2014) pour stipuler que différents types d'entraînement physique (dans cette étude, aérobie et renforcement musculaire du bas du corps, aérobie et renforcement musculaire du haut du corps, habiletés motrices complexes) peuvent améliorer de manière similaire les capacités cognitives des personnes âgées. Toutefois, si plusieurs chemins peuvent effectivement mener à Rome, cette thèse s'interroge, près de dix ans plus tard, sur l'efficacité comparative de ces itinéraires, en y ajoutant des parcours non évalués par Berryman et al. (2014) : des entraînements physique et cognitif simultanés et notamment des entraînements incorporés.

1. L'EFFICACITÉ DES ENTRAÎNEMENTS COMBINÉS : QUELLES PREUVES ?

1.1. À court terme : des bénéfices cognitifs, mais un effet synergique difficile à démontrer

Dans la perspective de la conception de la méthode d'entraînement optimale pour les personnes âgées, les chercheurs se sont intéressés aux programmes combinant l'entraînement physique à l'entraînement cognitif. L'objectif manifeste est le suivant : générer des effets cognitifs théoriquement synergiques selon Fissler et al. (2013), c'est-à-dire plus élevés que l'addition des effets des deux modalités séparées. Qu'en est-il des preuves actuelles concernant la supériorité de l'entraînement combiné par rapport aux modalités uniques ? C'est précisément la question soulevée par le titre de la méta-analyse de Zhu et al. (2016) : « *the more, the better?* » (en français : plus il y en a, mieux c'est ?). Empiriquement, les résultats convergent vers un bénéfice cognitif global, mais faible, de l'entraînement combiné (Gavelin et al., 2021 ; Wollesen et al., 2020 ; Yen & Chiu, 2021 ; Zhu et al., 2016), sans avantage clair lorsqu'il est comparé à l'entraînement cognitif (Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Zhu et al., 2016), et avec des résultats contrastés lorsqu'il est confronté à l'entraînement physique [certaines méta-analyses indiquent un léger avantage de l'entraînement combiné (Gavelin et al., 2021 ; Gheysen et al., 2018 ; Zhu et al., 2016), tandis que d'autres ne rapportent aucune différence (Guo et al., 2020)]. Les résultats de l'étude principale de cette thèse (étude 4) sont tout autant contrastés : l'entraînement combiné simultané se montre efficace pour améliorer la flexibilité cognitive et la mémoire visuospatiale à court terme. Cependant, il n'y a pas de supériorité de l'entraînement simultané par rapport aux entraînements physique ou cognitif concernant ces améliorations. De plus, cette étude montre que l'entraînement cognitif, réalisé par le biais de jeux vidéo sédentaires (mais moteurs), peut améliorer certaines capacités cognitives, ici l'inhibition, de manière plus importante que l'entraînement simultané.

Ces constats invitent donc à réviser l'interprétation littérale de « *plus il y en a, mieux c'est* », au profit d'une approche plus fine et qualitative de la conception des interventions. En ce sens, Pesce et al. (2012) recommandent aux futures recherches de prendre davantage en compte les aspects qualitatifs de l'entraînement (e.g., type de modalité, type d'exercice) plutôt que d'adopter une vision majoritairement quantitative (e.g., durée, fréquence, intensité).

Dans la perspective de l'analyse des aspects qualitatifs de l'entraînement simultané, il est notamment nécessaire de séparer leurs diverses formes en fonction de leur temporalité (i.e., simultanée, séquentielle), du lien entre les tâches motrices/physiques et cognitives (i.e., incorporé, additionnel), du type de sollicitation (i.e., cognitivo-motrice, cognitivo-physique, multi-domaine), de l'environnement (i.e., naturel, virtuel) et des différents types d'exercices proposés (e.g., DT, exergames, situations issues d'activités physiques de coopération et d'opposition). L'étude 4 a ainsi cherché à questionner l'effet de certaines de ces modalités. Plus précisément, elle a montré que l'entraînement incorporé était uniquement supérieur à l'entraînement additionnel pour améliorer les scores de temps de réaction. Ce résultat remet ainsi en question l'hypothèse d'Herold et al. (2018) selon laquelle l'entraînement incorporé serait généralement plus efficace que l'entraînement additionnel. D'autres modalités, autres que l'intégration de la tâche cognitive à la tâche physique/motrice peuvent également avoir un impact. Dans l'étude 4, l'environnement joue un rôle mineur, l'environnement virtuel (vs naturel) s'avérant plus efficace pour entraîner des bénéfices sur un seul indicateur : le temps de réaction simple (i.e., TR 2 choix). En prenant en compte ces deux aspects (i.e., environnement virtuel, entraînement incorporé), il est possible que certains types d'entraînement, ici par exemple les entraînements EM2I et SWITCH, soient plus efficaces que les entraînements additionnels naturels (e.g., entraînement en DT dans un contexte naturel, non testé dans cette thèse), et puissent générer un effet supérieur par rapport à l'entraînement physique et/ou cognitif. Néanmoins, cette hypothèse n'a pas été testée. De plus, le type de sollicitation (i.e., cognitivo-motrice, cognitivo-physique, multi-domaine) peut également jouer un rôle important sur l'amélioration des capacités cognitives, notamment via la sollicitation d'habiletés motrices complexes procurée par AM2C et EM2I, ainsi que la temporalité (i.e., simultanée vs séquentielle). Cependant, ces modalités n'ont pas été testées directement dans cette thèse.

Si les programmes combinés suscitent un intérêt croissant en raison de leurs bénéfices cognitifs potentiels, une question essentielle, reposant sur la théorie de facilitation de la plasticité guidée (Fissler et al., 2013), reste pourtant peu explorée : les gains observés relèvent-ils d'un effet synergique, ou seulement d'un effet additif ? Autrement dit, la combinaison des modalités génère-t-elle un effet supérieur à l'addition des bénéfices individuels, ou produit-elle uniquement un avantage simple ? Cette

distinction, souvent négligée, renvoie à une exigence méthodologique importante : la démonstration d'un effet synergique ne peut reposer sur une simple comparaison entre les groupes. Pour démontrer un véritable effet synergique, il est essentiel de recourir à une analyse statistique testant l'interaction entre les deux modalités d'intervention (i.e., cognitive, physique), comme dans l'étude de l'équipe de Bherer, publiée en deux volets. La première publication (Desjardins-Crépeau et al., 2016) porte sur les effets de l'entraînement combiné sur les capacités cognitives et physiques, et la seconde (Bherer et al., 2020) sur les capacités de DT (résultats présentés dans la partie 2.3 du chapitre 4 du cadre théorique). Cela nécessite un plan méthodologique avec au minimum trois groupes (i.e., entraînement combiné, physique, cognitif), comme l'étude de Pellegrini-Laplagne (2022), dans l'idéal quatre (i.e., ajout d'un groupe contrôle passif), ce qui reste rare. Ainsi, bien que certaines études rapportent des bénéfices cognitifs plus importants dans le groupe combiné (Anderson-Hanley et al., 2012 ; Béraud-Peigné et al., 2024 ; Oswald et al., 2006 ; Schättin et al., 2016), elles ne peuvent généralement pas formellement conclure à un effet synergique, mais seulement à un effet combiné globalement plus efficace que les entraînements physique ou cognitif. Dans ce contexte, et comme le supposent les résultats de Desjardins-Crépeau et al. (2016), il est possible qu'un effet synergique n'existe pas sur les fonctions cognitives. Leur équipe a néanmoins montré, en 2020, un effet synergique de l'entraînement combiné sur le maintien de multiples alternatives de réponse (*task-set cost* en anglais), mais non sur le coût de la DT cognitivo-cognitive. Dans cette thèse, un effet synergique n'a pas été recherché dans l'étude 4, étant donné que l'entraînement simultané ne montrait pas d'effet cognitif supérieur aux entraînements physique et cognitif seuls, et la question principale de recherche concernait la différence d'effets entre les entraînements incorporé et additionnel et non l'effet synergique.

L'entraînement simultané n'a pas produit d'effet sur deux fonctions exécutives : l'inhibition et la mémoire visuospatiale de travail. Plusieurs éléments, développés plus en détail dans la discussion de l'étude 4, peuvent expliquer cette absence d'effet. Premièrement, la durée des programmes pourrait avoir été insuffisante pour que les mécanismes neurophysiologiques sous-jacents produisent des effets mesurables sur ces fonctions, bien qu'un effet ait été observé pour la flexibilité cognitive. Deuxièmement, il est possible que les programmes simultanés aient sollicité plus directement la flexibilité cognitive (alternance de tâches, changements de règles) que l'inhibition ou la mémoire de travail, limitant ainsi les gains dans ces dernières. Troisièmement, la variabilité inter-individuelle observée pour les fonctions exécutives chez les personnes âgées, combinée à des tailles d'échantillons parfois réduites, a pu diminuer la puissance statistique pour détecter des effets. Quatrièmement, des effets plafond liés aux niveaux initiaux de performance élevée peuvent avoir restreint la marge de progression. Enfin, la sollicitation

simultanée des domaines physique/moteur et cognitif pourrait avoir réduit les ressources attentionnelles disponibles, induisant ainsi un effet négatif sur l'efficacité de l'entraînement.

1.2. Des effets physiques et en double-tâche peu évalués

L'entraînement combiné ne vise pas seulement à améliorer les performances cognitives, mais poursuit également un second objectif, parfois négligé : améliorer les capacités physiques et motrices des personnes âgées. En effet, de nombreuses études se concentrent sur les effets cognitifs, sans questionner les aspects physiques (e.g., Gheysen et al., 2018 ; Guo et al., 2020 ; Wollesen et al., 2020 ; Zhu et al., 2016). Or, sur le plan préventif, le maintien, voire l'amélioration, de ces capacités fonctionnelles constitue un déterminant majeur pour retarder la transition vers la fragilité. Dans cette perspective, lutter contre les comportements d'inactivité (sédentarité, temps assis prolongé) est essentiel : ces derniers réduisent la réserve fonctionnelle et, à terme, poussent vers la fragilité motrice, en cohérence avec le phénotype de fragilité de Fried et al. (2001). Les capacités physiques et motrices soutiennent directement les activités de la vie quotidienne et leur déclin s'accompagne d'une hausse du risque de chutes et de perte d'autonomie (Barry et al., 2014 ; Fleg, 2012). À l'inverse, l'activité physique, et notamment l'entraînement simultané, peut permettre d'entretenir cette réserve fonctionnelle.

Dans l'ensemble, les méta-analyses comparant l'entraînement combiné aux entraînements physique et cognitif suggèrent qu'il a un effet modeste mais positif sur différentes dimensions des capacités physiques et motrices, qu'il est généralement plus efficace que l'entraînement cognitif seul (Gavelin et al., 2021 ; Rieker et al., 2022 pour la condition physique) et équivalent voire légèrement supérieur à l'entraînement physique (Rieker et al., 2022 ; Teraz et al., 2022), selon les capacités évaluées. L'étude 4 indique que l'entraînement simultané est efficace pour améliorer la force du bas du corps, l'équilibre et la coordination et ce, de manière plus marquée que l'entraînement cognitif (et supérieur à l'entraînement physique pour la coordination et l'équilibre). Seul l'entraînement incorporé est capable d'améliorer la force du haut du corps et les capacités aérobies, et de manière plus importante que l'additionnel. De plus, l'entraînement incorporé est plus efficace que l'additionnel sur la force du bas du corps et la coordination. Ainsi, bien que le modèle d'Herold et al. (2018) se concentre sur les fonctions cognitives, cette étude indique que la distinction des effets des entraînements incorporé et additionnel pourrait se faire majoritairement sur les capacités physiques et motrices. La différence d'effets observée peut néanmoins s'expliquer majoritairement par les habiletés motrices sollicitées lors des programmes. En effet, les programmes EM2I et AM2C sont les plus complexes au niveau moteur, suivis de SWITCH puis de VÉLO-JV (pédaler sur un vélo stationnaire étant un mouvement très élémentaire). Ce continuum se reflète dans les améliorations physiques et motrices, avec un bénéfice sur 5 capacités pour EM2I (force

du bas et du haut du corps, équilibre, coordination, capacités aérobies), 4 capacités pour AM2C (force du bas et du haut du corps, équilibre, coordination), 3 capacités pour SWITCH (force du bas du corps, équilibre, coordination), contre une seule pour le groupe VÉLO-JV (équilibre). Ainsi, les effets des programmes incorporés pourraient être liés à la complexité motrice qu'ils induisent, rendue possible par l'incorporation des tâches. En effet, il semble plus difficile de mettre en place des exercices à forte complexité motrice lorsqu'ils sont combinés à une tâche cognitive additionnelle, puisque dans ce cas, ils pourraient avoir davantage tendance à induire un phénomène de « *Posture First* », amenant les participants à privilégier la stabilité posturale au détriment de la réalisation de la tâche cognitive, et ainsi réduire l'efficacité globale de l'exercice (Shumway-Cook & Woollacott, 2000).

L'évolution des performances physiques et motrices est d'autant plus importante à évaluer étant donné que grâce à ses effets neurophysiologiques (i.e., angiogenèse, synaptogenèse, neurogenèse) (voir partie 2.2.4 du chapitre 4 du cadre théorique), la sollicitation physique et motrice est théoriquement, au moins en partie, à l'origine des améliorations cognitives de l'entraînement combiné. C'est notamment ce que suppose cette thèse, puisque l'évolution de la fonction exécutive améliorée par l'entraînement (flexibilité cognitive) est prédite par le modèle de condition physique (force du haut et du bas du corps, équilibre, souplesse, capacités aérobies), et particulièrement par deux prédicteurs spécifiques : la coordination et les capacités aérobies. Ces résultats corroborent l'idée que l'amélioration des capacités aérobies peut être à l'origine de l'évolution cognitive (Colcombe & Kramer, 2003). L'hypothèse circulatoire postule que l'activité physique aérobie entraînerait une amélioration de l'aptitude cardiovasculaire (Kramer et al., 1999) reflétée par une meilleure VO_2max, générant une augmentation de la perfusion cérébrale (Salzman et al., 2022) et du flux sanguin régional, conduisant à l'apparition de nouveaux capillaires cérébraux (angiogenèse), notamment dans les régions frontales (Chapman et al., 2013 ; Mekari et al., 2019) régissant les fonctions exécutives. L'angiogenèse constitue aussi un terrain favorable à d'autres processus plastiques, comme notamment la neurogenèse. Ces modifications pourraient ainsi conduire à une meilleure efficacité cognitive. Certains travaux considèrent que l'augmentation des capacités aérobies serait le principal médiateur de l'amélioration des fonctions cognitives. Toutefois, cette hypothèse a été remise en question (Etnier et al., 2006). La présente étude révèle qu'une autre variable peut prédire l'amélioration de la flexibilité cognitive : la coordination. Cela peut faire référence à l'hypothèse de l'augmentation de la plasticité synaptique qui postule que sous l'effet de nouvelles expériences sensorielles et motrices, notamment liées à la pratique d'activités physiques, le réseau de connectivité neuronale se modifie en créant de nouvelles connexions (synaptogenèse) ou en renforçant l'efficacité de la transmission synaptique de certaines connexions (potentialisation à long terme). La nouveauté et la complexité des stimuli moteurs seraient des éléments

clés dans cette plasticité fonctionnelle (Kempermann et al., 2010 ; Voelcker-Rehage & Niemann, 2013). Cependant, il est important de souligner que le modèle testé, bien que significatif, n'explique que 11,6 % de la variance au test TMT (B-A). Les différents mécanismes présentés pourraient certes jouer un rôle, mais d'autres facteurs semblent également responsables de l'évolution de la flexibilité cognitive. De plus, le TM6 ne permet pas d'obtenir une mesure directe des capacités aérobies, même si une récente étude réalisée auprès de personnes âgées a montré une corrélation (modérée) entre la performance au TM6 et la VO_2max (Seldeen et al., 2024).

Cette thèse souligne ainsi l'intérêt de l'évaluation des capacités physiques et motrices, recommandant l'intégration de ces mesures dans l'ensemble des travaux évaluant les effets de l'entraînement combiné auprès des personnes âgées. Outre les capacités aérobies, la coordination semble être un indicateur nécessaire à prendre en compte pour comprendre les effets cognitifs des programmes mobilisant des habiletés motrices complexes, bien que des tests dédiés aux personnes âgées doivent faire l'objet de nouvelles études. Enfin, l'évaluation des capacités de DT est également de plus en plus étudiée, notamment lorsqu'il s'agit de l'entraînement combiné par rapport aux entraînements uniques. Les résultats de l'étude 4 ont indiqué un effet de l'entraînement simultané sur la tâche motrice de la DT cognitivo-motrice, avec un bénéfice supérieur de l'entraînement incorporé par rapport à l'additionnel et une amélioration spécifique de deux groupes : EM2I et AM2C. Les performances cognitives en DT cognitivo-motrice et en DT cognitivo-cognitive n'ont quant à elles pas progressé. Étant donné que les tâches constitutives de la DT évaluée étaient additionnelles (et non incorporées), ces résultats suggèrent un transfert d'un entraînement incorporé vers un contexte additionnel. L'absence de bénéfice cognitif pourrait tenir à la nature de la tâche de décompte utilisée qui présente un faible potentiel de progression (plafond/plancher) et à une forte variabilité interindividuelle (aisance arithmétique/stratégies) limitant la sensibilité au changement. Cependant, même sans gain cognitif en DT, une amélioration de la performance motrice est un objectif hautement pertinent pour l'autonomie des personnes âgées.

1.3. Une efficacité durable ? La question des effets à long terme

Jusqu'à présent, l'efficacité des entraînements a généralement été évaluée à travers leur capacité à produire des gains rapides de performance, mesurés immédiatement après la fin des programmes. Cette approche à court terme est semblable à celle empruntée en rééducation : mettre en place et évaluer un programme structuré, intensif, bien que potentiellement contraignant pour les participants. Il est donc recherché les bénéfices les plus importants possibles, dans un laps de temps court (3 à 6 mois), d'où l'utilisation de l'entraînement combiné. Mais cette logique est-elle réellement adaptée aux

objectifs d'un programme de prévention destiné aux personnes âgées ? Dans ce contexte, les enjeux dépassent les seuls effets immédiats : il s'agit de proposer des entraînements qui puissent être suivis à long terme, générant des bénéfices durables, ayant un impact fonctionnel sur la vie quotidienne, tout en favorisant l'adoption de comportements positifs pérennes. Autrement dit, l'efficacité à long terme (suivi d'un programme sur plusieurs mois, voire plusieurs années et non juste l'évaluation des effets de rétention) devrait constituer un critère central dans l'évaluation de ces programmes. L'étude 5 a cependant uniquement apporté des réponses concernant le maintien des effets trois mois après la fin des programmes. Elle semble indiquer que très peu d'effets, que ce soit cognitifs ou physiques persistent 3 mois après l'arrêt des entraînements. Les fonctions maintenues (flexibilité cognitive, force du bas du corps, coordination) sont celles qui avaient bénéficié des améliorations les plus importantes à court terme. Ce manque de maintien des effets peut s'expliquer par la faible durée des programmes qui n'ont pas permis de créer des bénéfices importants et d'induire une adaptation durable, ainsi que par l'absence de maintien de l'augmentation de certains comportements à la suite des programmes (détails dans le paragraphe suivant). Notamment chez les personnes âgées, l'arrêt de l'entraînement peut induire rapidement un effet réversible. Ces résultats, au-delà d'encourager la mise en place d'évaluations de rétention, incitent à poursuivre les entraînements sur le long terme pour, au minimum, maintenir les bénéfices perçus par un entraînement court, voire générer des effets plus robustes. De plus, il est possible que certaines approches nécessitent une durée d'entraînement plus longue, comme cela est potentiellement le cas de certains programmes évalués dans l'étude 4.

Dans le cadre de l'étude 4, la poursuite de l'entraînement aurait été particulièrement pertinente, d'autant plus que la compliance et le plaisir étaient élevés, notamment dans les programmes simultanés, laissant supposer que les participants auraient probablement poursuivi la pratique si celle-ci avait été encadrée. Les résultats du questionnaire de style de vie montrent que le score global, qui avait augmenté après l'entraînement simultané de manière comparable aux entraînements physique et cognitif seuls, est revenu à son niveau initial trois mois après l'arrêt des programmes. Cela suggère que les participants n'ont pas maintenu les activités (cognitives et/ou physiques) issues des programmes. Cette absence de poursuite peut s'expliquer par le fait que la participation à l'étude était entièrement gratuite, alors que l'inscription à une nouvelle activité est généralement payante. De plus, le caractère original des activités proposées lors des entraînements n'était pas retrouvé dans les offres d'activités à disposition des personnes âgées. Ces éléments ont pu constituer des obstacles au maintien de la pratique, mais cet aspect n'a pas été spécifiquement évalué. Il est donc recommandé, dans de futures recherches, de suivre précisément le niveau d'activités physiques et cognitives, ainsi que d'identifier les freins et leviers à la poursuite de la pratique.

2. COMPRENDRE LES EFFETS DES ENTRAÎNEMENTS AU-DELÀ DES SCORES DE LA PERFORMANCE : MÉTHODES, OUTILS ET PORTÉE DU TRANSFERT

2.1. Repenser l'évaluation

La question des effets des entraînements ne peut pas être abordée de manière approfondie sans considérer les méthodes d'évaluation utilisées. Cette thèse apporte ainsi une réflexion sur le choix des mesures employées et s'inscrit dans une volonté de proximité des exigences scientifiques et opérationnelles. Les tests des études 4 et 5 ont été sélectionnés et conçus (études 1 et 2) en tenant compte de critères essentiels pour une mise en œuvre concrète : faible coût, simplicité d'installation, mobilisation de peu de matériel et facilité d'utilisation par des EAPA. Ce souci d'applicabilité a orienté les choix méthodologiques des études 1 et 2, et motivé le développement de nouveaux tests adaptés aux contextes d'intervention.

Dans cette perspective, l'étude 1 a visé à développer de nouveaux outils d'évaluation cognitive adaptés aux personnes âgées, afin de répondre aux limites des tests traditionnellement utilisés dans la littérature. Ces derniers, bien que largement validés (e.g., Stroop, TMT, Corsi), présentent une faible valeur écologique et une sensibilité qui pourrait être améliorée pour détecter de faibles variations intergroupes ou des changements subtils liés à des interventions à court terme. Pour surmonter ces contraintes, l'étude 1 s'est appuyée sur les Dispositifs Lumineux Interactifs (DLI), et plus spécifiquement sur le système *Witty SEM*, afin de concevoir des tests pour évaluer quatre fonctions cognitives (e.g., flexibilité, inhibition, mémoire visuospatiale à court terme et de travail) sollicitant simultanément les dimensions motrices et cognitives. Ce choix technologique a permis de répondre à plusieurs critères clés identifiés dans cette thèse : i) une précision temporelle grâce à l'enregistrement automatisé des temps de réponse en millisecondes, ii) une proximité avec les situations de la vie quotidienne en intégrant une action motrice dans la réponse cognitive, et iii) une accessibilité pratique (i.e., faible encombrement, absence de clavier/souris, pas d'interface informatique complexe). Les résultats de cette étude ont montré que les tests DLI sont sensibles aux effets de l'âge et présentent une bonne validité convergente avec les tests classiques chez les personnes âgées. Utilisés dans le cadre des études 4 et 5, ils ont permis de mettre en évidence des différences significatives entre les entraînements incorporé et additionnel (TR 2, TR 8, TR 8 inhibition), et entre l'entraînement cognitif et simultané (score inhibition) ainsi qu'au niveau même des groupes.

Dans la continuité de cette démarche, l'étude 2 a poursuivi le développement de nouveaux tests, toujours dans une perspective d'intégration aux études 4 et 5, cette fois-ci centrée sur l'évaluation des capacités en DT cognitivo-motrice, en réponse à deux limites majeures de la littérature : i) la simplicité

des tâches motrices habituellement utilisées dans les paradigmes de DT (marche, équilibre statique) et ii) la sous-exploration des interférences cognitives. L'étude 2 a ainsi introduit une tâche motrice plus complexe (STEP, proche d'une situation quotidienne comme monter des escaliers) combinée à deux types de tâches cognitives distinctes : autogénérée (requérant une production cognitive interne) vs induite par l'environnement (liée à des stimuli extérieurs). Ce design a permis de tester l'hypothèse, formulée notamment par Al-Yahya et al. (2011), selon laquelle les tâches autogénérées perturberaient davantage les performances motrices en DT, du fait de leur concurrence avec les ressources attentionnelles mobilisées pour le contrôle moteur. Cette hypothèse étant formulée dans le cadre d'une tâche de marche, les résultats de l'étude 4 ont confirmé que les interférences motrices sont significativement plus marquées dans la condition autogénérée, en particulier chez les personnes âgées, dans une tâche motrice complexe. L'étude 2 a permis d'enrichir la batterie d'outils disponibles pour l'évaluation des effets des entraînements combinés, en proposant une méthode plus exigeante, et donc supposée plus discriminante que les paradigmes classiques. Le test de DT autogénérée développé dans cette étude a ainsi été intégré au protocole d'évaluation des études 4 et 5. Il a permis de détecter des améliorations des entraînements simultané et incorporé, une différence entre l'entraînement incorporé et additionnel, ainsi que des effets au niveau des groupes (EM2I, SWITCH). Les tests développés dans les études 1 et 2 et utilisés en études 4 et 5 ont également montré une bonne fiabilité test-retest, puisqu'aucune différence significative n'a été détectée entre les différents temps de mesure pour le groupe contrôle.

Enfin, les études 4 et 5 intègrent un test spécifiquement développé pour cette thèse, en raison du manque d'outils d'évaluation de la coordination chez les personnes âgées : le test de coordination réalisé avec une échelle de rythme. Il a permis de mettre en lumière de nombreuses différences d'évolution des entraînements (simultané vs contrôle, incorporé vs contrôle, simultané vs physique, simultané vs cognitif, incorporé vs additionnel, naturel vs virtuel) ainsi qu'au niveau même des groupes (EM2I, AM2C, SWITCH). De plus, il n'a pas reflété d'effet test-retest étant donné qu'il n'y avait pas d'amélioration significative du groupe contrôle. Des recherches sont cependant nécessaires pour valider ce test, mais ces premières études soulignent sa pertinence dans le cadre d'une méthodologie interventionnelle.

2.2. Effets de transfert : analyser la portée réelle des entraînements

Au-delà des effets mesurés à court terme, la question du transfert est un élément clé : dans quelle mesure les adaptations induites par l'entraînement se généralisent-elles à d'autres contenus et contextes ? La notion d'effet de transfert n'a pas été directement mesurée dans cette thèse, mais elle a

été tout de même abordée à travers les effets des entraînements. Le modèle de Barnett et Ceci (2002), présenté en détail dans la partie 1.3.2 du chapitre 2 du cadre théorique, fournit un cadre particulièrement utile pour analyser la distance du transfert, allant d'un transfert proche à un transfert éloigné, selon deux modalités complémentaires : le contenu transféré et le contexte de transfert. Cette analyse est d'autant plus pertinente dans cette thèse puisque celle-ci visait à évaluer des programmes induisant des bénéfices dans des situations distinctes des tâches d'entraînement, avec une portée fonctionnelle pour la vie quotidienne, et donc un transfert éloigné.

Les entraînements testés dans l'étude 4 ont permis d'observer des améliorations significatives dans des domaines variés : capacités physiques et motrices (i.e., force du haut et du bas du corps, équilibre, coordination, capacités aérobies), fonctions cognitives (i.e., flexibilité, mémoire visuospatiale à court terme, inhibition) et performances en DT cognitivo-motrice. Au niveau cognitif, ces effets traduisent un transfert de mobilisation de compétences généralement complexes et sur plusieurs domaines, qui ne se limitent pas à une reproduction des habiletés entraînées. Par exemple, des gains en flexibilité cognitive ou en inhibition ont été observés à la suite de certains des programmes, dans lesquels ces fonctions n'étaient pas directement ciblées, mais mobilisées de manière implicite à travers les jeux vidéo ou les activités de coopération et d'opposition. Spécifiquement pour les tests cognitifs et de DT, les consignes n'indiquaient pas explicitement aux participants comment répondre ni quelles stratégies utiliser[1]. Pour réussir, ils devaient mobiliser par eux-mêmes les types de réponses qu'ils jugeaient appropriés, ou utiliser spontanément une stratégie qu'ils avaient développée pendant l'entraînement. Cela signifie que les participants ne se contentaient pas d'appliquer une procédure apprise de manière automatique mais qu'ils devaient mobiliser activement leurs compétences dans une situation différente, sans aide extérieure, représentant ainsi un transfert éloigné. Cependant, au niveau physique et moteur, certains transferts peuvent être qualifiés de proches en termes de contenu. Par exemple, la coordination, améliorée spécifiquement par les groupes AM2C, EM2I et SWITCH, était sollicitée pendant ces programmes, ce qui n'était pas le cas des autres entraînements (VÉLO-JV, VÉLO, JV) qui n'ont, quant à eux, pas montré d'amélioration de cette capacité. En revanche, d'autres capacités physiques et motrices font l'objet d'un transfert plus éloigné en termes de contenu. C'est par exemple le cas de l'équilibre qui s'est amélioré pour tous les groupes simultanés, et notamment le groupe VÉLO-JV, dans lequel cette capacité n'a pas été mobilisée à l'entraînement.

[1] Par exemple, au test de Corsi, plusieurs stratégies sont possibles, telles que : regroupement spatial (chunking), encodage par trajectoires, utilisation de repères fixes, étiquetage verbal.

Parallèlement au contenu transféré, plusieurs dimensions du contexte diffèrent entre les entraînements et l'évaluation, suggérant généralement un transfert éloigné sur ce plan. Premièrement, les domaines de compétences évalués (e.g., physique, motrice, cognitive) ne sont pas identiques à ceux directement entraînés. Les programmes EM2I, SWITCH, VÉLO-JV et AM2C reposaient sur des entraînements combinés, sollicitant à la fois des capacités physiques/motrices et cognitives à travers des tâches dynamiques, souvent ludiques et interactives. En revanche, les évaluations réalisées concernaient des tests standardisés et généralement unidimensionnels avec des mesures soit majoritairement cognitives (e.g., mémoire, flexibilité cognitive), soit majoritairement physiques/motrices (e.g., équilibre, force). Seules quelques mesures (temps de réaction, temps de réaction avec inhibition, DT) présentaient un certain alignement modal avec les tâches simultanées des séances, mais l'essentiel du protocole d'évaluation demeure décontextualisé par rapport aux conditions d'entraînement. Cette dissociation entre la nature combinée des entraînements et la nature spécifique des évaluations traduit un changement de domaine de connaissances : les compétences acquises dans un domaine mixte sont transférées vers des domaines plus restreints, soit majoritairement cognitif, soit majoritairement physique ou moteur. L'effet de transfert peut également être analysé au niveau du contexte physique et social. Les évaluations ont été réalisées dans un cadre différent de celui des entraînements. Les tests étaient individuels, standardisés, effectués dans une salle de laboratoire, et sans stimulation ludique. À l'inverse, les entraînements se déroulaient en groupe, souvent avec de la musique (hormis VÉLO), des jeux et des interactions sociales créant des contextes dynamiques et variés. Cette dissociation accentue la distance du transfert. De plus, la proximité des modalités d'évaluation peut également avoir un impact sur l'effet de transfert. Ainsi, deux tests peuvent être considérés comme reflétant un transfert proche pour certains entraînements : le test de lancer de medicine ball et de coordination. Les participants des groupes AM2C et EM2I lançaient régulièrement des ballons (comme dans le test de lancer de medicine ball, bien que les conditions soient différentes) et réalisaient quelquefois des exercices à l'aide d'une échelle de rythme (matériel similaire au test de coordination). Par ailleurs, pour la majorité des tests, les effets observés ne se limitent pas à une reproduction de gestes appris lors des entraînements. Enfin, le contexte temporel a été étudié à travers l'évaluation à court terme et en rétention. L'étude 5 a permis d'évaluer la rétention des effets trois mois après la fin des entraînements. Les résultats indiquent un maintien relativement faible des bénéfices, ne confirmant pas un transfert éloigné dans le temps.

L'ensemble des résultats, replacé dans le cadre du modèle de Barnett & Ceci (2002), indique que les effets des entraînements simultanés observés relèvent majoritairement d'un transfert éloigné au niveau du contenu, du domaine (différents types de tâches entre l'entraînement et l'évaluation) et du

contexte physique et social. Par ailleurs, en considérant le contexte temporel, le transfert est majoritairement proche.

3. DE LA RECHERCHE AUX EXIGENCES DE TERRAIN

3.1. Adaptation du contenu au public cible

Plusieurs types de pratiques ont été testés dans cette thèse, avec une coloration forte de programmes utilisant des outils virtuels, et notamment des exergames. Étant donné les arguments théoriques et empiriques des effets de ces derniers (voir partie 4.2 du chapitre 4 du cadre théorique), ils sont de plus en plus utilisés en recherche pour l'entraînement auprès des personnes âgées. Cependant, les exergames procurent-ils une expérience globale (expérience utilisateur, plaisir perçu, intensité physique objective et subjective, charge de travail) adaptée et positive ? Existe-t-il des divergences sur cette expérience globale entre les différents types d'exergames ? Ces différences pouvant avoir un impact sur la pratique lors d'un entraînement, il était nécessaire de les évaluer en amont. L'étude 3 a ainsi joué un rôle clé pour examiner l'expérience globale vécue par les personnes âgées lors de l'utilisation de différents types d'exergames. Cette approche consiste en une phase exploratoire préalable aux études interventionnelles de plus grande ampleur, comme le préconise Campbell et al. (2000). En ce sens, l'étude 3 constitue une étape indispensable pour le déploiement effectif des programmes d'exergames dans un cadre expérimental structuré. Ainsi, elle a comparé les trois futurs exergames utilisés dans l'étude 4 (et 5), à savoir EM2I, SWITCH et VÉLO-JV. Cette étape était d'autant plus importante qu'aucune étude à notre connaissance n'avait jamais proposé d'exergames VÉLO-JV avec des outils similaires aux nôtres.

Les résultats de l'étude 3 indiquent qu'EM2I et SWITCH ont montré une expérience utilisateur (UX) et un plaisir perçu significativement plus élevés que VÉLO-JV. Cette meilleure UX s'explique par des caractéristiques plus adaptées aux personnes âgées : un contrôle du jeu par le corps (ou mixte), des interactions sociales favorisées (multi-joueurs), une diversité ludique plus marquée, et un lien entre les tâches motrices et cognitives (entraînement incorporé). Au-delà de l'aspect expérientiel, l'étude 3 a permis de s'assurer que les exergames sélectionnés atteignaient une intensité physique modérée à élevée, recommandée pour induire des bénéfices cognitifs et physiques (Audiffren et al., 2011 ; Swain et al., 2012). De plus, la charge de travail était adéquate et généralement équilibrée entre les différentes exigences, ce critère étant essentiel afin de garantir que les exergames proposent une expérience adaptée. Au niveau cognitif, aucune mesure n'a été réalisée, l'échelle cognitive utilisée en étude 4 n'a pas été employée en étude 3. Le NASA-TLX, qui inclut un item relatif à « l'exigence mentale », a toutefois été employé et ne révélait pas de différence significative entre les groupes.

Les intensités physiques (objectives et subjectives) ainsi que cognitives (subjectives) ont également été évaluées tout au long de l'étude 4. Ces mesures sont utiles pour s'assurer que l'entraînement est adapté au public cible, mais également comme facteur explicatif des améliorations observées (voir partie 4.2.2 de la discussion de l'étude 4 pour un détail). Cependant, l'absence de mesure de l'intensité cognitive objective représente une limite dans l'interprétation des résultats. Parmi les méthodes disponibles, l'EEG est l'une des plus couramment utilisées pour évaluer l'activité électrique du cerveau, en enregistrant les signaux cérébraux à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu (Müller-Putz, 2020), permettant ainsi d'évaluer les processus sous-jacents aux fonctions cognitives (Lau-Zhu et al., 2019).

Chez les personnes âgées, une des premières études mesurant la charge cognitive des exergames (SilverFit BV 3D) avec de l'EEG mobile (système *ActiCap*, *Brain Products* avec un amplificateur sans fil) a récemment été réalisée (Müller et al., 2023). Elle comparait deux types de jeux, intégrant tous les deux, deux niveaux de difficulté, par rapport à des mouvements de référence réalisés sans exergames. Elle a indiqué que l'activité theta frontale (souvent interprétée comme reflétant des processus de contrôle attentionnel) était plus élevée lors de la pratique d'exergames que lors de la pratique contrôle, indépendamment du type de jeu et du niveau de difficulté. Ce résultat suggère que les exergames engagent des ressources cognitives supplémentaires par rapport à une activité motrice seule. Ainsi, il aurait été particulièrement pertinent de comparer la charge cognitive induite par les trois exergames de cette thèse non seulement entre eux, mais également avec les séances AM2C, VÉLO et JV, afin de déterminer si des profils de sollicitation cognitive distincts sont associés à des différences d'UX ou de plaisir perçu (étude 3), mais également à des différences d'évolution cognitive (étude 4 et 5). Cependant, dans leur étude, Müller et al. (2023) précisent que leurs participants avaient été informés des artefacts possibles (composants indésirables qui déforment le signal brut) et invités à les réduire au maximum (clignement des yeux, serrage des dents, augmentation de l'activité musculaire) pendant l'activité. De plus, dans l'un des jeux, les mouvements de bras avaient été supprimés afin d'améliorer la qualité du signal EEG. Leur protocole évalue donc principalement la charge cognitive liée aux aspects ludiques et interactifs du jeu, plutôt que celle associée à la combinaison complète du mouvement et du jeu, caractéristique principale des exergames. Par conséquent, cette méthodologie n'est pas directement transposable aux entraînements étudiés dans cette thèse, qui nécessiteraient plutôt l'usage d'un système qui soit moins sensible aux artefacts. Une revue récente sur l'évaluation de la charge cognitive des exergames avec des EEG indique que la présence d'artefacts de mouvement peut entraîner une perte allant jusqu'à 50 % du signal EEG, ce qui pose des défis pour l'analyse et l'interprétation des données, mais que des analyses pertinentes pouvaient tout de même être réalisées avec les données disponibles

(Rico-Olarte et al., 2025). La fNIRS (méthode décrite dans la partie 4.2.2 de la discussion de l'étude 4) est également une méthode de plus en plus employée, permettant d'évaluer l'activation corticale en enregistrant les variations d'oxygénation sanguine cérébrale.

Ainsi, cette thèse a mis en lumière l'importance d'évaluer les indicateurs d'intensité, à la fois physiques et cognitifs, mais également objectifs et subjectifs. Des études caractérisant et comparant la charge cognitive des entraînements simultanés chez les personnes âgées de manière objective, sont nécessaires pour comprendre les mécanismes sous-jacents de certaines modalités dans les améliorations cognitives et ainsi proposer le contenu le plus adapté possible. Par ailleurs, d'autres facteurs de l'entraînement, et notamment le plaisir, doivent être pris en compte afin de concevoir une expérience globale positive.

3.2. Le plaisir comme facteur de compliance et de maintien

Les résultats de cette thèse indiquent que certains chemins semblent plus efficaces que d'autres pour améliorer les capacités physiques, motrices, cognitives et en DT. Mais emprunte-t-on uniquement un chemin car il est efficace *?* La pratique de l'activité physique et/ou de l'entraînement cognitif pour la santé, et donc l'amélioration des capacités par l'entraînement, est l'une des principales raisons, mais deux points importants doivent être pris en compte : le plaisir procuré par l'entraînement et l'envie de continuer celui-ci.

Le plaisir a été évalué conjointement dans les études 3 (plaisir sur une séance, uniquement pour les exergames) et 4 (plaisir sur l'ensemble de l'entraînement, pour tous les programmes). À court terme, l'étude 3 indique que les programmes EM2I et SWITCH procurent plus de plaisir que VÉLO-JV, avec des tailles d'effet élevées (respectivement d = 0,90 et d = 0,87). Cette différence peut s'expliquer en partie par la frustration que VÉLO-JV semble produire chez les participants (item du NASA-TLX, significativement plus élevé pour VÉLO-JV que EM2I), potentiellement causée par la difficulté à réaliser les tâches simultanées additionnelles et à utiliser uniquement des boutons pour jouer, méthode moins instinctive que des tâches incorporées et une utilisation minoritaire des boutons pour jouer. À long terme, le score de plaisir augmente pour tous les groupes, passant en moyenne de 60/70 (étude 3) à 65/70 (étude 4) pour SWITCH, de 61/70 à 64/70 pour EM2I et de 53/70 à 62/70 pour VÉLO-JV. Sur l'étude 4, aucune différence n'est observée entre les trois groupes. Ces résultats témoignent d'une intensification du plaisir à la suite d'une pratique d'exergames répétée, permettant potentiellement, grâce à l'apprentissage de l'utilisation de la technologie, de réduire la frustration initiale (majoritairement pour VÉLO-JV) et d'augmenter la familiarité avec les tâches (bien que cela n'ait pas été évalué dans

l'étude 4). De plus, l'étude 4 indique que l'entraînement simultané a produit plus de plaisir que les entraînements physique et cognitif seuls. Réaliser plusieurs tâches simultanément, qu'elles soient incorporées ou additionnelles, représente ainsi un défi plaisant pour les participants. Le programme AM2C procure également un plaisir élevé (65/70), et le contraste planifié virtuel vs naturel n'est pas significatif. Ainsi, l'environnement ne semble pas être à l'origine du plaisir procuré, celui-ci étant plutôt guidé par la nature ludique des exercices ainsi que les interactions sociales proposées.

L'envie de continuer les programmes, forte pour la majorité des groupes simultanés, est plus faible pour les participants du groupe JV (par rapport aux autres groupes), avec une surreprésentation des participants ayant une envie de continuer très faible (20 %, résidu = 3,80) et une sous-représentation des participants ayant une très forte envie de continuer (0 %, résidu = -3,37) ainsi qu'une envie modérée (40 %, résidu = 2,27). Dans un objectif de maintien de l'entraînement à long terme, les jeux vidéo, lorsqu'ils sont réalisés de manière sédentaire, ne semblent pas être l'option idéale pour l'entraînement des personnes âgées. Par ailleurs, introduire ces jeux vidéo avec de l'activité physique, grâce aux exergames ou alors par le biais de jeux issus d'activités de coopération et d'opposition réalisées dans un environnement naturel, permet d'offrir un format plaisant, donnant envie aux participants de poursuivre l'activité, comme le montrent les études 3 et 4.

3.3. Accessibilité et alternatives : quelles solutions réalistes pour les structures et les usagers ?

L'étude 4 a mis en évidence que les EM2I, en comparaison avec d'autres programmes, produisent des effets cognitifs, moteurs, physiques et de DT plus marqués (pour un récapitulatif des effets par programme, voir la partie 4.5 de la discussion de l'étude 4). Ils apparaissent comme la forme d'entraînement simultané testée la plus efficace. Au-delà de ces bénéfices multidimentionnels, qui positionnent les EM2I comme une stratégie efficace, ils suscitent également un plaisir élevé chez les personnes âgées. Cependant, même si les bénéfices attendus d'une intervention sont identifiés, et que son caractère plaisant est reconnu, reflétant son intérêt scientifique, son adoption reste conditionnée par sa faisabilité opérationnelle. Ce constat soulève une problématique importante quant au développement d'outils technologiques innovants dont les coûts ne sont pas abordables pour les individus ou les petites collectivités, comme c'est notamment le cas des dispositifs de type EM2I. Pour qu'un tel dispositif ait un impact concret sur le terrain, il doit d'abord être acquis par une structure (e.g., association, collectivité, entreprise) capable de le mettre à disposition de ses bénéficiaires. Par exemple, la ville de Montreuil propose une offre (payante) à ses habitants pour utiliser son mur interactif *Neo One*, la Maison Sport Santé SMUC (Marseille) s'est également équipée de ce dispositif et le Comité Régional

Nouvelle-Aquitaine met en location son mur interactif *Lü*. Cependant, l'achat de l'équipement ne suffit pas : il est indispensable de prévoir des programmes d'accompagnement, encadrés par des EAPA, afin d'initier les utilisateurs et de garantir une pratique sécuritaire. Un troisième obstacle concerne la capacité d'accueil des dispositifs. Dans les études 3 et 4, les séances d'EM2I étaient menées par groupes de quatre participants, en raison des contraintes d'espace et du profil du public visé. Augmenter le nombre de participants aurait accru le risque de blessures ou d'accidents, notamment dans le groupe EM2I, où les déplacements sont nombreux et effectués dans plusieurs directions. Ainsi, au coût d'acquisition du matériel et à l'exigence d'un encadrement professionnel, s'ajoute la contrainte de groupes restreints, condition nécessaire pour dispenser l'activité dans des conditions optimales.

Consciente des limites opérationnelles que peuvent présenter les outils technologiques, la recherche doit également s'intéresser à des méthodes d'entraînement intégrées à des environnements naturels. C'est notamment le cas des exercices moteurs et cognitifs complexes inspirés des sports collectifs de coopération et d'opposition, tels qu'évalués dans les études 4 et 5. Dans cette perspective, plusieurs fédérations sportives développent aujourd'hui des formats « santé » : Tennis Santé, Handfit, Basket Santé, Rugby Santé, Walking Foot, à destination des personnes âgées et/ou des personnes présentant des affections de longue durée (Breton et al., 2019 ; Perrier, 2021). Ces formats ludiques constituent des alternatives aux exergames, en proposant des formes d'entraînement incorporées et accessibles. Contrairement aux EM2I, ces pratiques nécessitent peu de matériel, sont peu coûteuses, et permettent d'accueillir un plus grand nombre de participants. Toutefois, leur développement suppose un travail de valorisation important afin de permettre i) aux structures accueillant des personnes âgées de proposer ces activités, et ii) de lever les réticences que les personnes âgées peuvent avoir à l'égard de ces pratiques, même adaptées (au même titre que les exergames). Par ailleurs, la formation spécifique des encadrants est également essentielle pour garantir la sécurité, la stimulation cognitive et physique effective, ainsi qu'une progressivité adaptée. Si certaines fédérations ont déjà amorcé des modules de formation de quelques heures, le déploiement opérationnel gagnerait à impliquer davantage de professionnels formés pour intervenir auprès de ce public (EAPA). Enfin, en France, le développement de ces activités repose fortement sur le tissu associatif lié aux fédérations, dont les priorités ne sont pas toujours orientées vers la pratique d'activité physique pour les seniors, mais plutôt vers la promotion des secteurs jeune ou compétitif (Perrier, 2021). L'ensemble des éléments limite le développement d'offres correspondant aux entraînements de cette thèse.

Références

Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology and motor skills research : Some applications and methodological constraints. *J Human Movement Studies*, *14*, 101-132.

Ackerman, P. L., Kanfer, R., & Calderwood, C. (2010). Use it or lose it? Wii brain exercise practice and reading for domain knowledge. *Psychology and Aging*, *25*(4), 753-766. https://doi.org/10.1037/a0019277

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., Lutz, K., Zizlsperger, L., Luft, A. R., Guimarães, V., Schättin, A., & de Bruin, E. D. (2020). Effects of an In-home Multicomponent Exergame Training on Physical Functions, Cognition, and Brain Volume of Older Adults : A Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Medicine*, *6*, 321. https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00321

Adcock, M., Sonder, F., Schättin, A., Gennaro, F., & de Bruin, E. D. (2020). A usability study of a multicomponent video game-based training for older adults. *European Review of Aging and Physical Activity*, *17*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s11556-019-0233-2

Adcock, M., Thalmann, M., Schättin, A., Gennaro, F., & de Bruin, E. D. (2019). A Pilot Study of an In-Home Multicomponent Exergame Training for Older Adults : Feasibility, Usability and Pre-Post Evaluation. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *11*, 304. https://doi.org/10.3389/fnagi.2019.00304

Agmon, M., Belza, B., Nguyen, H. Q., Logsdon, R., & Kelly, V. E. (2014). A systematic review of interventions conducted in clinical or community settings to improve dual-task postural control in older adults. *Clinical Interventions in Aging*, 477. https://doi.org/10.2147/CIA.S54978

Agmon, M., Perry, C. K., Phelan, E., Demiris, G., & Nguyen, H. Q. (2011). A Pilot Study of Wii Fit Exergames to Improve Balance in Older Adults. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, *34*(4), Article 4. https://doi.org/10.1519/JPT.0b013e3182191d98

Albinet, C., Bernard, P. L., & Palut, Y. (2006). Attentional control of postural stability in institutionalised elderly people : Effects of a physical exercise program. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique: Revue Scientifique de la Societe Francaise de Reeducation Fonctionnelle de Readaptation et de Medecine Physique*, *49*(9), 625-631. https://europepmc.org/article/med/16859801

Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *35*(3), Article 3. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008

Amieva, H., Phillips, L., & Della Sala, S. (2003). Behavioral dysexecutive symptoms in normal aging. *Brain and Cognition*, *53*(2), 129-132. https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00094-0

Ammann, B. C., Knols, R. H., Baschung, P., De Bie, R. A., & De Bruin, E. D. (2014). Application of principles of exercise training in sub-acute and chronic stroke survivors : A systematic review. *BMC Neurology*, *14*(1), 167. https://doi.org/10.1186/s12883-014-0167-2

Anderson-Hanley, C., Arciero, P. J., Brickman, A. M., Nimon, J. P., Okuma, N., Westen, S. C., Merz, M. E., Pence, B. D., Woods, J. A., Kramer, A. F., & Zimmerman, E. A. (2012). Exergaming and Older Adult Cognition : A Cluster Randomized Clinical Trial. *American Journal of Preventive Medicine*, *42*(2), 109-119. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2011.10.016

Anderson-Hanley, C., Barcelos, N. M., Zimmerman, E. A., Gillen, R. W., Dunnam, M., Cohen, B. D., Yerokhin, V., Miller, K. E., Hayes, D. J., Arciero, P. J., Maloney, M., & Kramer, A. F. (2018). The Aerobic and Cognitive Exercise Study (ACES) for Community-Dwelling Older Adults With or At-Risk for Mild Cognitive Impairment (MCI) : Neuropsychological, Neurobiological and Neuroimaging Outcomes of a Randomized Clinical Trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *10*, 76. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00076

Anderson-Hanley, C., Maloney, M., Barcelos, N., Striegnitz, K., & Kramer, A. (2017). Neuropsychological Benefits of Neuro-Exergaming for Older Adults : A Pilot Study of an Interactive Physical and Cognitive Exercise System (iPACES). *Journal of Aging and Physical Activity*, *25*(1), 73-83. https://doi.org/10.1123/japa.2015-0261

Ansai, J. H., De Andrade, L. P., De Souza Buto, M. S., De Vassimon Barroso, V., Farche, A. C. S., Rossi, P. G., & De Medeiros Takahashi, A. C. (2017). Effects of the Addition of a Dual Task to a Supervised Physical Exercise Program on Older Adults' Cognitive Performance. *Journal of Aging and Physical Activity*, *25*(2), 234-239. https://doi.org/10.1123/japa.2016-0094

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), 207-225. https://doi.org/10.3917/rne.034.0207

Bahureksa, L., Najafi, B., Saleh, A., Sabbagh, M., Coon, D., Mohler, M. J., & Schwenk, M. (2017). The Impact of Mild Cognitive Impairment on Gait and Balance : A Systematic Review and Meta-Analysis of Studies Using Instrumented Assessment. *Gerontology*, *63*(1), 67-83. https://doi.org/10.1159/000445831

Ballesteros, S., Prieto, A., Mayas, J., Toril, P., Pita, C., Ponce de Leon, L., Reales, J. M., & Waterworth, J. (2014). Brain training with non-action video games enhances aspects of cognition in older adults : A randomized controlled trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 277.

Ballesteros, S., Voelcker-Rehage, C., & Bherer, L. (2018). Cognitive and brain plasticity induced by physical exercise, cognitive training, video games, and combined interventions. In *Frontiers in human neuroscience* (Vol. 12, p. 169). Frontiers Media SA. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2018.00169/full

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.

Baltes, P. B., & Willis, S. L. (1982). Plasticity and Enhancement of Intellectual Functioning in Old Age. In F. I. M. Craik & S. Trehub (Éds.), *Aging and Cognitive Processes* (p. 353-389). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4178-9_19

Bamidis, P. D., Vivas, A. B., Styliadis, C., Frantzidis, C., Klados, M., Schlee, W., Siountas, A., & Papageorgiou, S. G. (2014). A review of physical and cognitive interventions in aging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *44*, 206-220. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.019

Bangsbo, J., Hansen, P. R., Dvorak, J., & Krustrup, P. (2015). Recreational football for disease prevention and treatment in untrained men : A narrative review examining cardiovascular health, lipid profile, body composition, muscle strength and functional capacity. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(9), 568-576. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094781

Barban, F., Annicchiarico, R., Melideo, M., Federici, A., Lombardi, M. G., Giuli, S., Ricci, C., Adriano, F., Griffini, I., Silvestri, M., Chiusso, M., Neglia, S., Ariño-Blasco, S., Cuevas Perez, R., Dionyssiotis, Y., Koumanakos, G., Kovačeić, M., Montero-Fernández, N., Pino, O., … Caltagirone, C. (2017). Reducing Fall Risk with Combined Motor and Cognitive Training in Elderly Fallers. *Brain Sciences*, *7*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/brainsci7020019

Barcelos, N., Shah, N., Cohen, K., Hogan, M. J., Mulkerrin, E., Arciero, P. J., Cohen, B. D., Kramer, A. F., & Anderson-Hanley, C. (2015). Aerobic and Cognitive Exercise (ACE) Pilot Study for Older Adults : Executive Function Improves with Cognitive Challenge While Exergaming. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *21*(10), 768-779. https://doi.org/10.1017/S1355617715001083

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

Barnes, J. N. (2015). Exercise, cognitive function, and aging. *Advances in Physiology Education*, *39*(2), 55-62.

Barnett, S. M., & Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? : A taxonomy for far transfer. *Psychological bulletin*, *128*(4), 612.

Barry, E., Galvin, R., Keogh, C., Horgan, F., & Fahey, T. (2014). Is the Timed Up and Go test a useful predictor of risk of falls in community dwelling older adults : A systematic review and meta- analysis. *BMC Geriatrics*, *14*(1), 14. https://doi.org/10.1186/1471-2318-14-14

Basak, C., Boot, W. R., Voss, M. W., & Kramer, A. F. (2008). Can training in a real-time strategy video game attenuate cognitive decline in older adults? *Psychology and Aging*, *23*(4), 765-777. https://doi.org/10.1037/a0013494

Bassey, E. J., Bendall, M. J., & Pearson, M. (1988). Muscle strength in the triceps surae and objectively measured customary walking activity in men and women over 65 years of age. *Clinical Science*, *74*(1), 85-89.

Beauchet, O., & Berrut, G. (2006). Marche et double tâche : Définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé. *Psychol NeuroPsychiatr Vieil*, *4*.

Belchior, P., Marsiske, M., Sisco, S. M., Yam, A., Bavelier, D., Ball, K., & Mann, W. C. (2013). Video game training to improve selective visual attention in older adults. *Computers in Human Behavior*, *29*(4), 1318-1324. https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.01.034

Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998). Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Memory & Cognition*, *26*(3), 572-583. https://doi.org/10.3758/BF03201163

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2022). Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées. *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie*, *22*(129), 149-157. https://doi.org/10.1016/j.npg.2021.08.002

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2023). The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults. *Games for Health Journal*, *12*(3), 220-227. https://doi.org/10.1089/g4h.2022.0075

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2024). The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults. *GeroScience*, *46*(2), Article 2. https://doi.org/10.1007/s11357-023-00952-w

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2025). Repenser l'activité physique pour un vieillissement cognitif actif grâce aux exergames : Une approche novatrice. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement*, *23*(2), 255-265. https://doi.org/10.1684/pnv.2025.1230

Béraud-Peigné, N., Perrot, A., & Maillot, P. (2023). Wireless Lighting System : A New Tool for Assessing Cognitive Functions in the Elderly. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, *13*(11), 943. https://doi.org/10.3390/bs13110943

Béraud-Peigné, N., Perrot, A., & Maillot, P. (2025). Active Video Games Training for Older Adults : Comparative Study of User Experience, Workload, Pleasure, and Intensity. *JMIR Serious Games*, *13*(1), e67314. https://doi.org/10.2196/67314

Béraud-Peigné, N., Perrot, A., Maquestiaux, F., & Maillot, P. (2025). Understanding Age-Related Interference in Cognitive-Motor Dual-Task Performance : A Novel Approach. *Experimental Aging Research*, 1-17. https://doi.org/10.1080/0361073X.2025.2528580

Berryman, N., Bherer, L., Nadeau, S., Lauzière, S., Lehr, L., Bobeuf, F., Lussier, M., Kergoat, M. J., Vu, T. T. M., & Bosquet, L. (2014). Multiple roads lead to Rome : Combined high-intensity aerobic and strength training vs. gross motor activities leads to equivalent improvement in executive functions in a cohort of healthy older adults. *AGE*, *36*(5), 9710. https://doi.org/10.1007/s11357-014-9710-8

Besombes, N., & Maillot, P. (2018). Body Involvement in Video Gaming as a Support for Physical and Cognitive Learning. *Games and Culture*, *15*(5), 565-584. https://doi.org/10.1177/1555412018820426

Best, J. R., Liu-Ambrose, T., Boudreau, R. M., Ayonayon, H. N., Satterfield, S., Simonsick, E. M., Studenski, S., Yaffe, K., Newman, A. B., Rosano, C., & for the Health, Aging and Body Composition Study. (2016). An Evaluation of the Longitudinal, Bidirectional Associations Between Gait Speed and Cognition in Older Women and Men. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *71*(12), 1616-1623. https://doi.org/10.1093/gerona/glw066

Bethancourt, H. J., Rosenberg, D. E., Beatty, T., & Arterburn, D. E. (2014). Barriers to and Facilitators of Physical Activity Program Use Among Older Adults. *Clinical Medicine & Research*, *12*(1-2), 10-20. https://doi.org/10.3121/cmr.2013.1171

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., Gagnon, C., Langeard, A., Lussier, M., Desjardins-Crépeau, L., Berryman, N., Bosquet, L., Vu, T. T. M., Fraser, S., Li, K. Z. H., & Kramer, A. F. (2020). Synergistic Effects of Cognitive Training and Physical Exercise on Dual-Task Performance in Older Adults. *The Journals of Gerontology: Series B*, *76*(8), 1533-1541. https://doi.org/10.1093/geronb/gbaa124

Bherer, L., Langeard, A., Kaushal, N., Vrinceanu, T., Desjardins-Crépeau, L., Langlois, F., & Kramer, A. F. (2021). Physical Exercise Training Effect and Mediation Through Cardiorespiratory Fitness on Dual-Task Performances Differ in Younger–Old and Older–Old Adults. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *76*(2), 219-228. https://doi.org/10.1093/geronb/gbz066

Bittner, A. C., Byers, J. C., Hill, S. G., Zaklad, A. L., & Christ, R. E. (1989). Generic Workload Ratings of a Mobile Air Defense System (LOS-F-H). *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, *33*(20), Article 20. https://doi.org/10.1177/154193128903302026

Boisgontier, M. P., Beets, I. A. M., Duysens, J., Nieuwboer, A., Krampe, R. T., & Swinnen, S. P. (2013). Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks : Increased recruitment of generic cognitive resources in older adults. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(8), 1824-1837. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.07.014

Borella, E., Carretti, B., & De Beni, R. (2008). Working memory and inhibition across the adult life-span. *Acta psychologica*, *128*(1), 33-44.

Borg, G. A. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *14*(5), 377-381. https://doi.org/10.1249/00005768-198205000-00012

Bouchard, C., Blair, S. N., & Haskell, W. L. (2012). *Physical activity and health*. Human kinetics.

Bouchard, D. R., Héroux, M., & Janssen, I. (2011). Association Between Muscle Mass, Leg Strength, and Fat Mass With Physical Function in Older Adults : Influence of Age and Sex. *Journal of Aging and Health*, *23*(2), 313-328. https://doi.org/10.1177/0898264310388562

Breton, P., Morello, R., Blanc-Gonnet, J., Le Houerou, C., Le Coutour, X., & Guincestre, J.-Y. (2019). Le Basket Santé : Évaluation, bénéfices et perspectives sur une cohorte de participants au cours de la saison 2017/2018. *Science & Sports*, *34*(4), 208-215. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2019.05.004

Broady, T., Chan, A., & Caputi, P. (2010). Comparison of older and younger adults' attitudes towards and abilities with computers : Implications for training and learning. *British Journal of Educational Technology*, *41*(3), Article 3. https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2008.00914.x

Brown, L. A., Sleik, R. J., Polych, M. A., & Gage, W. H. (2002). Is the Prioritization of Postural Control Altered in Conditions of Postural Threat in Younger and Older Adults? *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *57*(12), M785-M792. https://doi.org/10.1093/gerona/57.12.M785

Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free-recall performance. *Psychology and aging*, *11*(1), 3.

Bull, F. C., Al-Ansari, S. S., Biddle, S., Borodulin, K., Buman, M. P., Cardon, G., Carty, C., Chaput, J.-P., Chastin, S., & Chou, R. (2020). World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *British journal of sports medicine*, *54*(24), 1451-1462.

Buttar, K., Saboo, N., & Kacker, S. (2019). A review : Maximal oxygen uptake (VO2 max) and its estimation methods. *Journal of Physical Education, Sports and Health*, *6*(6), 24-32.

Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults : The HAROLD model. *Psychology and Aging*, *17*(1), 85-100. https://doi.org/10.1037/0882-7974.17.1.85

Campbell, M. (2000). Framework for design and evaluation of complex interventions to improve health. *BMJ*, *321*(7262), Article 7262. https://doi.org/10.1136/bmj.321.7262.694

Campo-Prieto, P., Cancela, J. M., & Rodríguez-Fuentes, G. (2021). Immersive virtual reality as physical therapy in older adults : Present or future (systematic review). *Virtual Reality*, *25*(3), 801-817. https://doi.org/10.1007/s10055-020-00495-x

Carlson, M. C., Saczynski, J. S., Rebok, G. W., Seeman, T., Glass, T. A., McGill, S., Tielsch, J., Frick, K. D., Hill, J., & Fried, L. P. (2008). Exploring the effects of an "everyday" activity program on executive function and memory in older adults : Experience Corps®. *The Gerontologist*, *48*(6), 793-801.

Caserman, P., Hoffmann, K., Müller, P., Schaub, M., Straßburg, K., Wiemeyer, J., Bruder, R., & Göbel, S. (2020). Quality Criteria for Serious Games : Serious Part, Game Part, and Balance. *JMIR Serious Games*, *8*(3), e19037. https://doi.org/10.2196/19037

Caspersen, C. J., Powell, K. E., & Christenson, G. M. (1985). Physical activity, exercise, and physical fitness : Definitions and distinctions for health-related research. *Public health reports*, *100*(2), 126.

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

Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). *Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX*. 233-239.

Cerella, J., & Hale, S. (1994). The rise and fall in information-processing rates over the life span. *Acta psychologica*, *86*(2-3), 109-197.

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/fnagi.2013.00075

Chauvel, G., Maquestiaux, F., Hartley, A. A., Joubert, S., Didierjean, A., & Masters, R. S. W. (2012). Age Effects Shrink when Motor Learning is Predominantly Supported by Nondeclarative, Automatic Memory Processes : Evidence from Golf Putting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(1), Article 1. https://doi.org/10.1080/17470218.2011.588714

Chaytor, N., & Schmitter-Edgecombe, M. (2003). The Ecological Validity of Neuropsychological Tests : A Review of the Literature on Everyday Cognitive Skills. *Neuropsychology Review*, *13*(4), Article 4. https://doi.org/10.1023/B:NERV.0000009483.91468.fb

Chen, X., Wu, L., Feng, H., Ning, H., Wu, S., Hu, M., Jiang, D., Chen, Y., Jiang, Y., & Liu, X. (2023). Comparison of Exergames Versus Conventional Exercises on the Health Benefits of Older Adults : Systematic Review With Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *JMIR Serious Games*, *11*, e42374. https://doi.org/10.2196/42374

Chen, Y., Zhang, Y., Guo, Z., Bao, D., & Zhou, J. (2021). Comparison between the effects of exergame intervention and traditional physical training on improving balance and fall prevention in healthy older adults : A systematic review and meta-analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *18*(1), 164. https://doi.org/10.1186/s12984-021-00917-0

Cheng, Y., Wu, W., Feng, W., Wang, J., Chen, Y., Shen, Y., Li, Q., Zhang, X., & Li, C. (2012). The effects of multi-domain versus single-domain cognitive training in non-demented older people : A randomized controlled trial. *BMC Medicine*, *10*(1), 30. https://doi.org/10.1186/1741-7015-10-30

Chou, C.-H., Hwang, C.-L., & Wu, Y.-T. (2012). Effect of Exercise on Physical Function, Daily Living Activities, and Quality of Life in the Frail Older Adults : A Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *93*(2), 237-244. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.08.042

Cipolotti, L., & Warrington, E. K. (1995). Neuropsychological assessment. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *58*(6), 655. https://doi.org/10.1136/jnnp.58.6.655

Clark, J. E., Lanphear, A. K., & Riddick, C. C. (1987). The Effects of Videogame Playing on the Response Selection Processing of Elderly Adults. *Journal of Gerontology*, *42*(1), Article 1. https://doi.org/10.1093/geronj/42.1.82

Clouston, S. A. P., Brewster, P., Kuh, D., Richards, M., Cooper, R., Hardy, R., Rubin, M. S., & Hofer, S. M. (2013). The Dynamic Relationship Between Physical Function and Cognition in Longitudinal Aging Cohorts. *Epidemiologic Reviews*, *35*(1), Article 1. https://doi.org/10.1093/epirev/mxs004

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioural sciences. Hillsdale, New Jersey : L. *Lea*, *56*, 102.

Cohn, N. B., Dustman, R. E., & Bradford, D. C. (1984). Age-related decrements in stroop color test performance. *Journal of Clinical Psychology*, *40*(5), Article 5. https://doi.org/10.1002/1097-4679(198409)40:5%253C1244::AID-JCLP2270400521%253E3.0.CO;2-D

Colcombe, S., 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., & 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

Colcombe, S., 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

Craik, F. I. M., & Byrd, M. (1982). Aging and Cognitive Deficits. In F. I. M. Craik & S. Trehub (Éds.), *Aging and Cognitive Processes* (p. 191-211). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4178-9_11

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

Cuevas-Trisan, R. (2017). Balance Problems and Fall Risks in the Elderly. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, *28*, 727-737.

Cunningham, C., O'Sullivan, R., Caserotti, P., & Tully, M. A. (2020). Consequences of physical inactivity in older adults—A systematic review of reviews and meta-analyses. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *30*(5), 816-827. https://doi.org/10.1111/sms.13616

Da Silva Júnior, J. L. A., Biduski, D., Bellei, E. A., Becker, O. H. C., Daroit, L., Pasqualotti, A., Tourinho Filho, H., & De Marchi, A. C. B. (2021). A Bowling Exergame to Improve Functional Capacity in Older Adults : Co-Design, Development, and Testing to Compare the Progress of Playing Alone Versus Playing With Peers. *JMIR Serious Games*, *9*(1), e23423. https://doi.org/10.2196/23423

da Silva, R. S. N., da Silva, D. S., de Oliveira, P. C., Waclawovsky, G., & Schaun, M. I. (2024). Effects of aerobic, resistance and combined training on endothelial function and arterial stiffness in older adults : A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, *19*(12), e0308600.

Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology : A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*, *35*(8), 982-1003. https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982

Dawson, C., Maxwell, S., Perez, O., Zarei, S. S., Green, D., Hoag, B., Wong, M., Davis, D., Cowley, J. C., & Funk, M. (2024). Concurrent Heart Rate and Energy Expenditure Validity of Polar Verity Sense Devices During Light and Moderate Intensity Resistance Training in Recreationally Active Adults : A Pilot Study. *International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings*, *14*(4), 179. https://digitalcommons.wku.edu/ijesab/vol14/iss4/179/

Delignières, D., & Perez, S. (1998). Le plaisir perçu dans la pratique des APS : élaboration d'un outil d'évaluation. *Revue STAPS*, *45*, 7-18.

Deng, N., Soh, K. G., Abdullah, B. B., Tan, H., & Huang, D. (2024). Active video games for improving health-related physical fitness in older adults : A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, *12*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1345244

Desjardins-Crépeau, L., Berryman, N., Fraser, S., Vu, T. T. M., Kergoat, M.-J., Li, K., Bosquet, L., & Bherer, L. (2016). Effects of combined physical and cognitive training on fitness and neuropsychological outcomes in healthy older adults. *Clinical Interventions in Aging*, *Volume 11*, 1287-1299. https://doi.org/10.2147/CIA.S115711

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

Desrosiers, J., Rochette, A., & Corriveau, H. (2005). Validation of a New Lower-Extremity Motor Coordination Test. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *86*(5), 993-998. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2004.11.007

Diamond, A., & Ling, D. (2020). *Review of the Evidence on, and Fundamental Questions About, Efforts to Improve Executive Functions, Including Working Memory* (p. 143-431). https://doi.org/10.1093/oso/9780199974467.003.0008

Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *18*, 34-48. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005

Diamond, A., & Ling, D. S. (2019a). Aerobic-Exercise and resistance-training interventions have been among the least effective ways to improve executive functions of any method tried thus far. *Developmental cognitive neuroscience*, *37*, 100572.

Diamond, A., & Ling, D. S. (2019b). Review of the Evidence on, and Fundamental Questions About, Efforts to Improve Executive Functions, Including Working Memory. In A. Diamond & D. S. Ling, *Cognitive and Working Memory Training* (p. 143-431). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780199974467.003.0008

Dite, W., & Temple, V. A. (2002). A clinical test of stepping and change of direction to identify multiple falling older adults. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *83*(11), 1566-1571.

Divandari, N., Bird, M., Vakili, M., & Jaberzadeh, S. (2024). The association between dynamic balance and executive function : Which dynamic balance test has the strongest association with executive function? A systematic review and meta-analysis. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, *24*(6), 151-161. https://doi.org/10.1007/s11910-024-01340-3

Dixon, R. A., & Bäckman, L. E. (1995). *Compensating for psychological deficits and declines : Managing losses and promoting gains.* https://psycnet.apa.org/record/1995-98961-000

Doherty, T. J., Vandervoort, A. A., & Brown, W. F. (1993). Effects of Ageing on the Motor Unit : A Brief Review. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *18*(4), 331-358. https://doi.org/10.1139/h93-029

Donath, L., Rössler, R., & Faude, O. (2016). Effects of Virtual Reality Training (Exergaming) Compared to Alternative Exercise Training and Passive Control on Standing Balance and Functional Mobility in Healthy Community-Dwelling Seniors : A Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*, *46*(9), 1293-1309. https://doi.org/10.1007/s40279-016-0485-1

DREES. (2023, décembre). *Etudes et Résultats—L'espérance de vie sans incapacité à 65 ans est de 11,8 ans pour les femmes et de 10,2 ans pour les hommes en 2022—Numéro 1290*. DREES. https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2023-12/ER1290.pdf

Dupuy, O., Ludyga, S., Ortega, F. B., Hillman, C. H., Erickson, K. I., Herold, F., Kamijo, K., Wang, C.-H., Morris, T. P., Brown, B., Esteban-Cornejo, I., Solis-Urra, P., Bosquet, L., Gerber, M., Mekari, S., Berryman, N., Bherer, L., Rattray, B., Liu-Ambrose, T., … Cheval, B. (2024). Do not underestimate the cognitive benefits of exercise. *Nature Human Behaviour*, *8*(8), 1460-1463. https://doi.org/10.1038/s41562-024-01949-x

Ebersbach, G., Dimitrijevic, M. R., & Poewe, W. (1995). Influence of Concurrent Tasks on Gait : A Dual-Task Approach. *Perceptual and Motor Skills*, *81*(1), Article 1. https://doi.org/10.2466/pms.1995.81.1.107

Eggenberger, E., Eggenberger, P., Schumacher, V., Angst, M., & Theill, N. (2015). Does multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training boost cognitive performance in older adults? A 6-month randomized controlled trial with a 1-year follow-up. *Clinical Interventions in Aging*, *10*, 1335. https://doi.org/10.2147/CIA.S87732

Ehsani, H., Mohler, M. J., O'Connor, K., Zamrini, E., Tirambulo, C., & Toosizadeh, N. (2019). The association between cognition and dual-tasking among older adults : The effect of motor function type and cognition task difficulty. *Clinical Interventions in Aging*, *Volume 14*, 659-669. https://doi.org/10.2147/CIA.S198697

Elferink-Gemser, M. T., Faber, I. R., Visscher, C., Hung, T.-M., de Vries, S. J., & Nijhuis-Van der Sanden, M. W. G. (2018). Higher-level cognitive functions in Dutch elite and sub-elite table tennis players. *PLOS ONE*, *13*(11), e0206151. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206151

Erickson, K. I., Hillman, C. H., & Kramer, A. F. (2015). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *4*, 27-32. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.01.005

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

Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance : Its structure and acquisition. *American psychologist*, *49*(8), 725.

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

Fabel, K. (2009). Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. *Frontiers in Neuroscience*. https://doi.org/10.3389/neuro.22.002.2009

Fabre, C., Chamari, K., Mucci, P., Masse-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

Falbo, S., Condello, G., Capranica, L., Forte, R., & Pesce, C. (2016). Effects of Physical-Cognitive Dual Task Training on Executive Function and Gait Performance in Older Adults : A Randomized Controlled Trial. *BioMed Research International*, *2016*, 1-12. https://doi.org/10.1155/2016/5812092

Falck, R., Davis, J., Best, J., Crockett, R., & Liu-Ambrose, T. (2019). Impact of exercise training on physical and cognitive function among older adults : A systematic review and meta-analysis. *Neurobiology of aging*, *79*, 119-130. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2019.03.007

Fallahtafti, F., Boron, J. B., Venema, D. M., Kim, H. J., & Yentes, J. M. (2021). Task specificity impacts dual-task interference in older adults. *Aging Clinical and Experimental Research*, *33*(3), Article 3. https://doi.org/10.1007/s40520-020-01575-3

Fang, Q., Ghanouni, P., Anderson, S. E., Touchett, H., Shirley, R., Fang, F., & Fang, C. (2020). Effects of Exergaming on Balance of Healthy Older Adults : A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Games for Health Journal*, *9*(1), 11-23. https://doi.org/10.1089/g4h.2019.0016

Ferketich, A., Kirby, T., & Alway, S. (1998). Cardiovascular and muscular adaptations to combined endurance and strength training in elderly women. *Acta Physiologica Scandinavica*, *164*(3), 259-267. https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.1998.00428.x

Fillit, H. M., Butler, R. N., O'Connell, A. W., Albert, M. S., Birren, J. E., Cotman, C. W., Greenough, W. T., Gold, P. E., Kramer, A. F., Kuller, L. H., Perls, T. T., Sahagan, B. G., & Tully, T. (2002). Achieving and Maintaining Cognitive Vitality With Aging. *Mayo Clinic Proceedings*, *77*(7), 681-696. https://doi.org/10.4065/77.7.681

Finkelstein, S., & Suma, E. A. (2011). Astrojumper : Motivating Exercise with an Immersive Virtual Reality Exergame. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *20*(1), 78-92. https://doi.org/10.1162/pres_a_00036

Fisher, J. P., Hartwich, D., Seifert, T., Olesen, N. D., McNulty, C. L., Nielsen, H. B., van Lieshout, J. J., & Secher, N. H. (2013). Cerebral perfusion, oxygenation and metabolism during exercise in young and elderly individuals. *The Journal of Physiology*, *591*(7), 1859-1870. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.244905

Fissler, P., Küster, O., Schlee, W., & Kolassa, I.-T. (2013). Novelty Interventions to Enhance Broad Cognitive Abilities and Prevent Dementia. *Progress in Brain Research*, *207*, 403-434. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00017-5

Fjell, A. M., & Walhovd, K. B. (2010). Structural Brain Changes in Aging : Courses, Causes and Cognitive Consequences. *Reviews in the Neurosciences*, *21*(3). https://doi.org/10.1515/REVNEURO.2010.21.3.187

Fleg, J. L. (2012). Aerobic Exercise in the Elderly : A Key to Successful Aging. *Discovery Medicine*, *13*(70), 223-228.

Fleg, J. L., Morrell, C. H., Bos, A. G., Brant, L. J., Talbot, L. A., Wright, J. G., & Lakatta, E. G. (2005). Accelerated Longitudinal Decline of Aerobic Capacity in Healthy Older Adults. *Circulation*, *112*(5), 674-682. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.105.545459

Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state". *Journal of Psychiatric Research*, *12*(3), 189-198. https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6

Forte, R., Boreham, C., Leite, J., De Vito, G., Brennan, L., Gibney, E., & Pesce, C. (2013). Enhancing cognitive functioning in the elderly : Multicomponent vs resistance training. *Clinical Interventions in Aging*, *8*, 19-27. https://doi.org/10.2147/CIA.S36514

Franzen, M. D., & Wilhelm, K. L. (1996). Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In *Ecological validity of neuropsychological testing* (p. 91-112). Gr Press/St Lucie Press, Inc.

Fraser, S., & Bherer, L. (2013). Age-related decline in divided-attention : From theoretical lab research to practical real-life situations. *WIREs Cognitive Science*, *4*(6), 623-640. https://doi.org/10.1002/wcs.1252

Fried, L. P., Tangen, C. M., Walston, J., Newman, A. B., Hirsch, C., Gottdiener, J., Seeman, T., Tracy, R., Kop, W. J., Burke, G., & McBurnie, M. A. (2001). Frailty in Older Adults : Evidence for a Phenotype. *The Journals of Gerontology: Series A*, *56*(3), M146-M157. https://doi.org/10.1093/gerona/56.3.M146

Fritsch, T., Smyth, K. A., Debanne, S. M., Petot, G. J., & Friedland, R. P. (2005). Participation in Novelty-Seeking Leisure Activities and Alzheimer's Disease. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, *18*(3), 134-141. https://doi.org/10.1177/0891988705277537

Fukagawa, N. K., Wolfson, L., Judge, J., Whipple, R., & King, M. (1995). Strength is a major factor in balance, gait, and the occurrence of falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *50*(Special_Issue), 64-67.

Gallou-Guyot, M., Bruyneel, A.-V., Mandigout, S., & Perrochon, A. (2025). Using dual-task effect for cognitive-motor change profiling–the Dual-Task Progress model. *European rehabilitation journal*, *5*(1), 1-9.

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Bherer, L., & Perrochon, A. (2020). Effects of exergames and cognitive-motor dual-task training on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults : An overview. *Ageing Research Reviews*, *63*, 101135. https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101135

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Marie, R., Robin, L., Daviet, J.-C., & Perrochon, A. (2023). Feasibility and potential cognitive impact of a cognitive-motor dual-task training program using a custom exergame in older adults : A pilot study. *Frontiers in aging neuroscience*, *15*, 1046676.

Garcia-Cabello, E., Gonzalez-Burgos, L., Pereira, J. B., Hernández-Cabrera, J. A., Westman, E., Volpe, G., Barroso, J., & Ferreira, D. (2021). The Cognitive Connectome in Healthy Aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *13*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.694254

Gates, N., & Valenzuela, M. (2010). Cognitive exercise and its role in cognitive function in older adults. *Current psychiatry reports*, *12*, 20-27.

Gavelin, H. M., Dong, C., Minkov, R., Bahar-Fuchs, A., Ellis, K. A., Lautenschlager, N. T., Mellow, M. L., Wade, A. T., Smith, A. E., Finke, C., Krohn, S., & Lampit, A. (2021). Combined physical and cognitive training for older adults with and without cognitive impairment : A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. *Ageing Research Reviews*, *66*, 101232. https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101232

Gellish, R. L., Goslin, B. R., Olson, R. E., McDonald, A., & Russi, G. D. (2007). Longitudinal Modeling of the Relationship between Age and Maximal Heart Rate. *Medicine and science in sports and exercise*, *39*(5), 822-829. https://doi.org/10.1097/mss.0b013e31803349c6

Gerling, K. M., Schild, J., & Masuch, M. (2011). Exergaming for Elderly : Analyzing Player Experience and Performance. In M. Eibl (Éd.), *Mensch & Computer 2011* (p. 401-411). Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. https://doi.org/10.1524/9783486712742.401

Gerling, K., & Mandryk, R. (2014). Custom-designed motion-based games for older adults : A review of literature in human-computer interaction. *Gerontechnology*, *12*(2), Article 2. https://doi.org/10.4017/gt.2013.12.2.001.00

Gheysen, F., Poppe, L., DeSmet, A., Swinnen, S., Cardon, G., De Bourdeaudhuij, I., Chastin, S., & Fias, W. (2018). Physical activity to improve cognition in older adults : Can physical activity programs enriched with cognitive challenges enhance the effects? A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, *15*(1), 63. https://doi.org/10.1186/s12966-018-0697-x

Gibala, M. J., Little, J. P., MacDonald, M. J., & Hawley, J. A. (2012). Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *The Journal of Physiology*, *590*(5), 1077-1084. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.224725

Godefroy, O. (2012). *Fonctions exécutives et pathologies neurologiques et psychiatriques*. De Boeck Superieur. https://u-picardie.hal.science/hal-04075025/

Gonzalo-Skok, O., Serna, J., Rhea, M. R., & Marín, P. J. (2015). Relationships between functional movement tests and performance tests in young elite male basketball players. *International Journal of Sports Physical Therapy*, *10*(5), Article 5. https://doi.org/10(5):628-638

Goodpaster, B. H., Park, S. W., Harris, T. B., Kritchevsky, S. B., Nevitt, M., Schwartz, A. V., Simonsick, E. M., Tylavsky, F. A., Visser, M., Newman, A. B., & for the Health ABC Study. (2006). The Loss of Skeletal Muscle Strength, Mass, and Quality in Older Adults : The Health, Aging and Body Composition Study. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *61*(10), 1059-1064. https://doi.org/10.1093/gerona/61.10.1059

Goul, W. R., & Brown, M. (1970). Effects of Age and Intelligence on Trail Making Test Performance and Validity. *Perceptual and Motor Skills*, *30*(1), Article 1. https://doi.org/10.2466/pms.1970.30.1.319

Graves, L. E. F., Ridgers, N. D., Williams, K., Stratton, G., Atkinson, G., & Cable, N. T. (2010). The Physiological Cost and Enjoyment of Wii Fit in Adolescents, Young Adults, and Older Adults. *Journal of Physical Activity and Health*, *7*(3), 393-401. https://doi.org/10.1123/jpah.7.3.393

Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your brain : A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging*, *23*(4), 692-701. https://doi.org/10.1037/a0014345

Green, C. S., Li, R., & Bavelier, D. (2010). Perceptual Learning During Action Video Game Playing. *Topics in Cognitive Science*, *2*(2), 202-216. https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01054.x

Greenwood, P. M., & Parasuraman, R. (2010). Neuronal and Cognitive Plasticity : A Neurocognitive Framework for Ameliorating Cognitive Aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *2*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2010.00150

Gréhaigne, J.-F., & Dietsch, G. (2015). L'opposition et ses concepts associés en sports collectifs. *eJRIEPS. Ejournal de la recherche sur l'intervention en éducation physique et sport*, *Hors-série N° 1*, Article Hors-série N° 1. https://journals.openedition.org/ejrieps/1308

Grosboillot, N., Gallou-Guyot, M., Lamontagne, A., Bonnyaud, C., Perrot, A., Allali, G., & Perrochon, A. (2024). Towards a comprehensive framework for complex walking tasks : Characterization, behavioral adaptations, and clinical implications in ageing and neurological populations. *Ageing Research Reviews*, *101*, 102458. https://doi.org/10.1016/j.arr.2024.102458

Guo, W., Zang, M., Klich, S., Kawczyński, A., Smoter, M., & Wang, B. (2020). Effect of Combined Physical and Cognitive Interventions on Executive Functions in Older Adults : A Meta-Analysis of Outcomes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(17), 6166. https://doi.org/10.3390/ijerph17176166

Hale, S., & Myerson, J. (1996). Experimental evidence for differential slowing in the lexical and nonlexical domains. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *3*(2), 154-165. https://doi.org/10.1080/13825589608256621

Harris, C., Wattles, A. P., DeBeliso, M., Sevene-Adams, P. G., Berning, J. M., & Adams, K. J. (2011). The Seated Medicine Ball Throw as a Test of Upper Body Power in Older Adults. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *25*(8), 2344-2348. https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ecd27b

Hart, S. G. (2006). Nasa-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *50*(9), 904-908. https://doi.org/10.1177/154193120605000909

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 139-183). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9

Hartley, A. A., & Little, D. M. (1999). Age-related differences and similarities in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*(4), Article 4. https://doi.org/10.1037/0096-3445.128.4.416

Hassenzahl, M. (2003). The Thing and I : Understanding the Relationship Between User and Product. In M. A. Blythe, K. Overbeeke, A. F. Monk, & P. C. Wright (Éds.), *Funology* (Vol. 3, p. 31-42). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4

Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff : Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus & J. Ziegler (Éds.), *Mensch & Computer 2003* (Vol. 57, p. 187-196). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80058-9_19

Hawkins, H. L., Kramer, A. F., & Capaldi, D. (1992). Aging, exercise, and attention. *Psychology and Aging*, *7*(4), 643-653. https://doi.org/10.1037/0882-7974.7.4.643

Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance : Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, *52*(4), Article 4. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.11.001

Hernandez-Martinez, J., Ramos-Espinoza, F., Muñoz-Vásquez, C., Guzman-Muñoz, E., Herrera-Valenzuela, T., Branco, B. H. M., Castillo-Cerda, M., & Valdés-Badilla, P. (2024). Effects of active exergames on physical performance in older people : An overview of systematic reviews and meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, *12*, 1250299. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1250299

Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., & Müller, N. G. (2018). Thinking While Moving or Moving While Thinking – Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *10*, 228. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00228

Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2009). Enrichment Effects on Adult Cognitive Development : Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? *Psychological Science in the Public Interest*, *9*(1), 1-65. https://doi.org/10.1111/j.1539-6053.2009.01034.x

Hillman, C. H., McAuley, E., Erickson, K. I., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2019). On mindful and mindless physical activity and executive function : A response to Diamond and Ling (2016). *Developmental cognitive neuroscience*, *37*, 100529.

Hindin, S. B., & Zelinski, E. M. (2012). Extended Practice and Aerobic Exercise Interventions Benefit Untrained Cognitive Outcomes in Older Adults : A Meta-Analysis. *Journal of the American Geriatrics Society*, *60*(1), 136-141. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2011.03761.x

Hiyamizu, M., Morioka, S., Shomoto, K., & Shimada, T. (2012). Effects of dual task balance training on dual task performance in elderly people : A randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, *26*(1), Article 1. https://doi.org/10.1177/0269215510394222

Hoda, M., Alattas, R., & Saddik, A. E. (2013). Evaluating Player Experience in Cycling Exergames. *2013 IEEE International Symposium on Multimedia*, 415-420. https://doi.org/10.1109/ISM.2013.81

Hollenberg, M., Yang, J., Haight, T. J., & Tager, I. B. (2006). Longitudinal changes in aerobic capacity : Implications for concepts of aging. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *61*(8), 851-858.

Holtzer, R., Shuman, M., Mahoney, J. R., Lipton, R., & Verghese, J. (2010). Cognitive Fatigue Defined in the Context of Attention Networks. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *18*(1), 108-128. https://doi.org/10.1080/13825585.2010.517826

Holtzer, R., Verghese, J., Xue, X., & Lipton, R. B. (2006). Cognitive processes related to gait velocity : Results from the Einstein aging study. *Neuropsychology*, *20*(2), Article 2. https://doi.org/10.1037/0894-4105.20.2.215

Horníková, H. (2023). Determinants of Reactive Agility Performance in Table Tennis Players. *Studia Sportiva*, *16*(2), Article 2. https://doi.org/10.5817/StS2022-2-2

Horníková, H., Jeleň, M., & Zemková, E. (2021). Determinants of Reactive Agility in Tests with Different Demands on Sensory and Motor Components in Handball Players. *Applied Sciences*, *11*(14), Article 14. https://doi.org/10.3390/app11146531

Horváth, D., Négyesi, J., Győri, T., Szűcs, B., Tóth, P. J., Matics, Z., Ökrös, C., Sáfár, S., Szabó, N., Takács, B., Kathy, R., Tóth, K., Ferguson, D. P., Nagatomi, R., & Rácz, L. (2022). Application of a Reactive Agility Training Program Using Light-Based Stimuli to Enhance the Physical and Cognitive Performance of Car Racing Drivers : A Randomized Controlled Trial. *Sports Medicine - Open*, *8*(1), Article 1. https://doi.org/10.1186/s40798-022-00509-9

Hötting, K., Schauenburg, G., & Röder, B. (2012). Long-term effects of physical exercise on verbal learning and memory in middle-aged adults : Results of a one-year follow-up study. *Brain Sciences*, *2*(3), 332-346.

Howard, D. V. (1988). Implicit and Explicit Assessment of Cognitive Aging. In M. L. Howe & C. J. Brainerd (Éds.), *Cognitive Development in Adulthood* (p. 3-37). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3852-2_1

Howes, S. C., Charles, D. K., Marley, J., Pedlow, K., & McDonough, S. M. (2017). Gaming for Health : Systematic Review and Meta-analysis of the Physical and Cognitive Effects of Active Computer Gaming in Older Adults. *Physical Therapy*, *97*(12), 1122-1137. https://doi.org/10.1093/ptj/pzx088

Huang, G., Gibson, C. A., Tran, Z. V., & Osness, W. H. (2005). Controlled Endurance Exercise Training and VO2max Changes in Older Adults : A Meta-Analysis. *Preventive Cardiology*, *8*(4), 217-225. https://doi.org/10.1111/j.0197-3118.2005.04324.x

Huang, K.-T. (2020). Exergaming Executive Functions : An Immersive Virtual Reality-Based Cognitive Training for Adults Aged 50 and Older. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *23*(3), 143-149. https://doi.org/10.1089/cyber.2019.0269

Hultsch, D. F., Hertzog, C., Small, B. J., & Dixon, R. A. (1999). Use it or lose it : Engaged lifestyle as a buffer of cognitive decline in aging? *Psychology and aging*, *14*(2), 245.

Hunter, G. R., McCarthy, J. P., & Bamman, M. M. (2004). Effects of Resistance Training on Older Adults. *Sports Med*, *34*(5), 329-348.

Ilin, D., & Kalron, A. (2025). Reproducibility and convergent validity of the blazepod stepping reaction test in older people. *Gait & Posture*, *119*, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.02.015

Insee. (2024). *Population par sexe et groupe d'âges en 2025 : Proportions*. Insee. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381474#figure1_radio2

Izquierdo, Ibañez, Gorostiaga, Garrues, Zúñiga, Antón, Larrión, & Häkkinen. (1999). Maximal strength and power characteristics in isometric and dynamic actions of the upper and lower extremities in middle-aged and older men. *Acta Physiologica Scandinavica*, *167*(1), 57-68. https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.1999.00590.x

Jaeggi, S. M., Buschkuehl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(19), 6829-6833. https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105

Janhunen, M., Karner, V., Katajapuu, N., Niiranen, O., Jaakko, I., Karvanen, J., Heinonen, A., & Aartolahti, E. (2021). *Effectiveness of Exergame Intervention on Walking in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials*. *101*(9), pzab152. https://doi.org/10.1093/ptj/pzab152

Jiang, J., Guo, W., & Wang, B. (2022). *Effects of exergaming on executive function of older adults: A systematic review and meta-analysis*. https://doi.org/10.7717/peerj.13194

Johnson, D., Deterding, S., Kuhn, K.-A., Staneva, A., Stoyanov, S., & Hides, L. (2016). Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature. *Internet Interventions*, *6*, 89-106. https://doi.org/10.1016/j.invent.2016.10.002

Jones, C. J., Rikli, R. E., & Beam, W. C. (1999). A 30-s Chair-Stand Test as a Measure of Lower Body Strength in Community-Residing Older Adults. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *70*(2), 113-119. https://doi.org/10.1080/02701367.1999.10608028

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). Citeseer. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=eeb97f210404ca6758c6cfe41cbe552feed5f59e

Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental Science*, *12*(6), 978-990. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00846.x

Kearney, F. C., Harwood, R. H., Gladman, J. R., Lincoln, N., & Masud, T. (2013). The relationship between executive function and falls and gait abnormalities in older adults: A systematic review. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, *36*(1-2), Article 1-2.

Keating, C. J., Montilla, J. Á. P., Román, P. Á. L., & Castillo, R. M. del. (2020). Comparison of High-Intensity Interval Training to Moderate-Intensity Continuous Training in Older Adults: A Systematic Review. *Journal of Aging and Physical Activity*, *28*(5), 798-807. https://doi.org/10.1123/japa.2019-0111

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

Kempermann, G. (2019). Environmental enrichment, new neurons and the neurobiology of individuality. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(4), 235-245.

Kempermann, G., Fabel, K., Ehninger, D., Babu, H., Leal-Galicia, P., Garthe, A., & Wolf, S. A. (2010). Why and How Physical Activity Promotes Experience-Induced Brain Plasticity. *Frontiers in Neuroscience*, *4*, 189. https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00189

Kendzierski, D., & DeCarlo, K. J. (1991). Physical Activity Enjoyment Scale: Two Validation Studies. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *13*(1), Article 1. https://doi.org/10.1123/jsep.13.1.50

Ketelhut, S., Röglin, L., Martin-Niedecken, A. L., Nigg, C. R., & Ketelhut, K. (2022). Integrating regular exergaming sessions in the exercube into a school setting increases physical fitness in elementary school children: A randomized controlled trial. *Journal of clinical medicine*, *11*(6), 1570.

Kim, S. Y. (Su), Prestopnik, N., & Biocca, F. A. (2014). Body in the interactive game: How interface embodiment affects physical activity and health behavior change. *Computers in Human Behavior*, *36*, 376-384. https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.03.067

Klusmann, V., Evers, A., Schwarzer, R., Schlattmann, P., Reischies, F. M., Heuser, I., & Dimeo, F. C. (2010). Complex mental and physical activity in older women and cognitive performance: A 6-month randomized controlled trial. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, *65*(6), 680-688.

Knaepen, K., Goekint, M., Heyman, E. M., & Meeusen, R. (2010). Neuroplasticity – Exercise-Induced Response of Peripheral Brain-Derived Neurotrophic Factor: A Systematic Review of Experimental Studies in Human Subjects. *Sports Medicine*, *40*(9), 765-801. https://doi.org/10.2165/11534530-000000000-00000

Kober, S. E., Kurzmann, J., & Neuper, C. (2012). Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, *83*(3), Article 3. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.12.003

Kodama, S., Saito, K., Tanaka, S., Maki, M., Yachi, Y., Asumi, M., Sugawara, A., Totsuka, K., Shimano, H., & Ohashi, Y. (2009). Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: A meta-analysis. *Jama*, *301*(19), 2024-2035.

Koss, E., Haxby, J. V., DeCarli, C., Schapiro, M. B., Friedland, R. P., & Rapoport, S. I. (1991). Patterns of performance preservation and loss in healthy aging. *Developmental Neuropsychology*, *7*(1), Article 1. https://doi.org/10.1080/87565649109540479

Kraft, E. (2012). Cognitive function, physical activity, and aging: Possible biological links and implications for multimodal interventions. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *19*(1-2), 248-263. https://doi.org/10.1080/13825585.2011.645010

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), 418-419. https://doi.org/10.1038/22682

Laatar, R., Kachouri, H., Borji, R., Rebai, H., & Sahli, S. (2018). Combined physical-cognitive training enhances postural performances during daily life tasks in older adults. *Experimental Gerontology*, *107*, 91-97. https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.09.004

Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Eyrolles.

Lallemand, C., Koenig, V., Gronier, G., & Martin, R. (2015). Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *European Review of Applied Psychology*, *65*(5), 239-252. https://doi.org/10.1016/j.erap.2015.08.002

Lampit, A., Hallock, H., & Valenzuela, M. (2014). Computerized Cognitive Training in Cognitively Healthy Older Adults : A Systematic Review and Meta-Analysis of Effect Modifiers. *PLoS Medicine*, *11*(11), e1001756. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001756

Larsen, L. H., Schou, L., Lund, H. H., & Langberg, H. (2013). The Physical Effect of Exergames in Healthy Elderly—A Systematic Review. *Games for Health Journal*, *2*(4), 205-212. https://doi.org/10.1089/g4h.2013.0036

Lauenroth, A., Ioannidis, A. E., & Teichmann, B. (2016). Influence of combined physical and cognitive training on cognition : A systematic review. *BMC Geriatrics*, *16*(1), 141. https://doi.org/10.1186/s12877-016-0315-1

Lau-Zhu, A., Lau, M. P., & McLoughlin, G. (2019). Mobile EEG in research on neurodevelopmental disorders : Opportunities and challenges. *Developmental cognitive neuroscience*, *36*, 100635.

Leenders, K. L., Perani, D., Lammertsma, A. A., Heather, J. D., Buckingham, P., Jones, T., Healy, M. J. R., Gibbs, J. M., Wise, R. J. S., & Hatazawa, J. (1990). Cerebral blood flow, blood volume and oxygen utilization : Normal values and effect of age. *Brain*, *113*(1), 27-47.

Li, J., Erdt, M., Chen, L., Cao, Y., Lee, S.-Q., & Theng, Y.-L. (2018). The social effects of exergames on older adults : Systematic review and metric analysis. *Journal of medical Internet research*, *20*(6), e10486.

Li, J., Li, L., Huo, P., Ma, C., Wang, L., & Theng, Y. L. (2021). Wii or Kinect? A Pilot Study of the Exergame Effects on Older Adults' Physical Fitness and Psychological Perception. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(24), Article 24. https://doi.org/10.3390/ijerph182412939

Li, K. Z. H., Bherer, L., Mirelman, A., Maidan, I., & Hausdorff, J. M. (2018). Cognitive Involvement in Balance, Gait and Dual-Tasking in Aging : A Focused Review From a Neuroscience of Aging Perspective. *Frontiers in Neurology*, *9*, 913. https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00913

Lin, T.-W., Tsai, S.-F., & Kuo, Y.-M. (2018). Physical Exercise Enhances Neuroplasticity and Delays Alzheimer's Disease. *Brain Plasticity*, *4*(1), 95-110. https://doi.org/10.3233/BPL-180073

Linde, K., & Alfermann, D. (2014). Single Versus Combined Cognitive and Physical Activity Effects on Fluid Cognitive Abilities of Healthy Older Adults : A 4-Month Randomized Controlled Trial With Follow-Up. *Journal of Aging and Physical Activity*, *22*(3), 302-313. https://doi.org/10.1123/JAPA.2012-0149

Lindenberger, U., Mayr, U., & Kliegl, R. (1993). Speed and intelligence in old age. *Psychology and aging*, *8*(2), 207.

Liu, Y., Barker, A. R., Li, M., Gu, Y., & Williams, C. A. (2025). Validation of polar verity sense for heart rate monitoring during school-based high-intensity interval training in adolescents. *Journal of Sports Sciences*, *43*(11), 1076-1084. https://doi.org/10.1080/02640414.2025.2491163

Liu-Ambrose, T., Nagamatsu, L. S., Graf, P., Beattie, B. L., Ashe, M. C., & Handy, T. C. (2010). Resistance Training and Executive Functions : A 12-Month Randomized Controlled Trial. *Archives of Internal Medicine*, *170*(2), 170-178. https://doi.org/10.1001/archinternmed.2009.494

Longo, L. (2018). Experienced mental workload, perception of usability, their interaction and impact on task performance. *PLOS ONE*, *13*(8), e0199661. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199661

Lopez-Fontana, I., Perrot, A., Krueger, K. R., Le Scanff, C., Bherer, L., & Castanier, C. (2020). A global lifestyle assessment : Psychometric properties of the General Lifestyle Questionnaire. *Psychologie Française*, *65*(4), Article 4. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2019.06.004

Lövdén, M., Schaefer, S., Pohlmeyer, A. E., & Lindenberger, U. (2008). Walking Variability and Working-Memory Load in Aging : A Dual-Process Account Relating Cognitive Control to Motor Control Performance. *The Journals of Gerontology: Series B*, *63*(3), P121-P128. https://doi.org/10.1093/geronb/63.3.P121

Lövdén, M., Xu, W., & Wang, H.-X. (2013). Lifestyle change and the prevention of cognitive decline and dementia : What is the evidence? *Current opinion in psychiatry*, *26*(3), 239-243.

Lu, H., Xu, F., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Cheng, Y., Flicker, B., Hebrank, A. C., Uh, J., & Park, D. C. (2011). Alterations in Cerebral Metabolic Rate and Blood Supply across the Adult Lifespan. *Cerebral Cortex*, *21*(6), 1426-1434. https://doi.org/10.1093/cercor/bhq224

Ludyga, S., Gerber, M., Pühse, U., Looser, V. N., & Kamijo, K. (2020). Systematic review and meta-analysis investigating moderators of long-term effects of exercise on cognition in healthy individuals. *Nature human behaviour*, *4*(6), 603-612.

Luximon, A., & Goonetilleke, R. S. (2001). Simplified subjective workload assessment technique. *Ergonomics*, *44*(3), 229-243. https://doi.org/10.1080/00140130010000901

Lyons, E. J., Tate, D. F., Ward, D. S., Ribisl, K. M., Bowling, J. M., & Kalyanaraman, S. (2014). Engagement, enjoyment, and energy expenditure during active video game play. *Health Psychology*, *33*(2), 174-181. https://doi.org/10.1037/a0031947

Maclean, L. M., Brown, L. J. E., & Astell, A. J. (2014). The Effect of Rhythmic Musical Training on Healthy Older Adults' Gait and Cognitive Function. *The Gerontologist*, *54*(4), 624-633. https://doi.org/10.1093/geront/gnt050

Madden, D., Blumenthal, J., Allen, P., & Emery, C. (1989). Improving Aerobic Capacity in Healthy Older Adults Does Not Necessarily Lead to Improved Cognitive Performance. *Psychology and aging*, *4*, 307-320. https://doi.org/10.1037/0882-7974.4.3.307

Maillot, P., Becquard, C., & Perrot, A. (2018). Motivation des personnes âgées à pratiquer une activité physique. *Gérontologie et société*, *40*(2), 127. https://doi.org/10.3917/gs1.156.0127

Maillot, P., Perrot, A., & Hartley, A. (2012). Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. *Psychology and Aging*, *27*(3), 589-600. https://doi.org/10.1037/a0026268

Manser, P., de Bruin, E. D., Temprado, J.-J., Bherer, L., & Herold, F. (2025). Beyond "just" fun : The role of exergames in advancing health promotion and disease prevention. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *176*, 106260. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2025.106260

Manser, P., Herold, F., & De Bruin, E. D. (2024). Components of effective exergame-based training to improve cognitive functioning in middle-aged to older adults – A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, *99*, 102385. https://doi.org/10.1016/j.arr.2024.102385

Mansor, N. S., Chow, C. M., & Halaki, M. (2020). Cognitive effects of video games in older adults and their moderators : A systematic review with meta-analysis and meta-regression. *Aging & Mental Health*, *24*(6), Article 6. https://doi.org/10.1080/13607863.2019.1574710

Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization : The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, perception & psychophysics*, *80*(3), Article 3. https://doi.org/10.3758/s13414-017-1469-4

Marquié, J. C., & Isingrini, M. (2001). Aspects cognitifs du vieillissement normal. *Vieillissement et psychomotricité*, 77-113.

Marston, H. R., Kroll, M., Fink, D., & Gschwind, Y. J. (2016). Flow Experience of Older Adults Using the iStoppFalls Exergame. *Games and Culture*, *11*(1-2), 201-222. https://doi.org/10.1177/1555412015605219

Martin-Niedecken, A. L., Mahrer, A., Rogers, K., de Bruin, E. D., & Schättin, A. (2020). "HIIT" the ExerCube : Comparing the effectiveness of functional high-intensity interval training in conventional vs. exergame-based training. *Frontiers in Computer Science*, *2*, 33.

Martin-Niedecken, A. L., & Mekler, E. D. (2018). The ExerCube : Participatory Design of an Immersive Fitness Game Environment. In S. Göbel, A. Garcia-Agundez, T. Tregel, M. Ma, J. Baalsrud Hauge, M. Oliveira, T. Marsh, & P. Caserman (Éds.), *Joint International Conference on Serious Games* (p. 263-275). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02762-9_28

Martin-Niedecken, A. L., Rogers, K., Turmo Vidal, L., Mekler, E. D., & Márquez Segura, E. (2019). ExerCube vs. Personal Trainer : Evaluating a Holistic, Immersive, and Adaptive Fitness Game Setup. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-15. https://doi.org/10.1145/3290605.3300318

Martin-Niedecken, A. L., Schwarz, T., & Schättin, A. (2021). Comparing the Impact of Heart Rate-Based In-Game Adaptations in an Exergame-Based Functional High-Intensity Interval Training on Training Intensity and Experience in Healthy Young Adults. *Frontiers in Psychology*, *12*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.572877

Mathiowetz, V., Kashman, N., Volland, G., Weber, K., Dowe, M., & Rogers, S. (1985). Grip and pinch strength : Normative data for adults. *Arch Phys Med Rehabil*, *66*(2), 69-74.

Mayorga-Vega, D., Merino-Marban, R., & Viciana, J. (2014). Criterion-Related Validity of Sit-and-Reach Tests for Estimating Hamstring and Lumbar Extensibility : A Meta-Analysis. *Journal of Sports Science & Medicine*, *13*(1), 1-14.

McDowd, J. M., & Shaw, R. J. (2000). Attention and aging : A functional perspective. *The handbook of aging and cognition*, 221-292.

McEwen, S. C., Siddarth, P., Abedelsater, B., Kim, Y., Mui, W., Wu, P., Emerson, N. D., Lee, J., Greenberg, S., Shelton, T., Kaiser, S., Small, G. W., & Merrill, D. A. (2018). Simultaneous Aerobic Exercise and Memory Training Program in Older Adults with Subjective Memory Impairments. *Journal of Alzheimer's Disease*, *62*(2), 795-806. https://doi.org/10.3233/JAD-170846

McIsaac, T. L., Lamberg, E. M., & Muratori, L. M. (2015). Building a Framework for a Dual Task Taxonomy. *BioMed Research International*, *2015*, 1-10. https://doi.org/10.1155/2015/591475

Mekari, S., Dupuy, O., Martins, R., Evans, K., Kimmerly, D. S., Fraser, S., & Neyedli, H. F. (2019). The effects of cardiorespiratory fitness on executive function and prefrontal oxygenation in older adults. *GeroScience*, *41*(5), 681-690. https://doi.org/10.1007/s11357-019-00128-5

Mekari, S., Neyedli, H. F., Fraser, S., O'Brien, M. W., Martins, R., Evans, K., Earle, M., Aucoin, R., Chiekwe, J., Hollohan, Q., Kimmerly, D. S., & Dupuy, O. (2020). High-Intensity Interval Training Improves Cognitive Flexibility in Older Adults. *Brain Sciences*, *10*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/brainsci10110796

Mielke, M. M., Roberts, R. O., Savica, R., Cha, R., Drubach, D. I., Christianson, T., Pankratz, V. S., Geda, Y. E., Machulda, M. M., & Ivnik, R. J. (2013). Assessing the temporal relationship between cognition and gait : Slow gait predicts cognitive decline in the Mayo Clinic Study of Aging. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, *68*(8), 929-937.

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). *Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum* (H. Das, Éd. ; p. 282-292). https://doi.org/10.1117/12.197321

Miller, J., Ulrich, R., & Rolke, B. (2009). On the optimality of serial and parallel processing in the psychological refractory period paradigm : Effects of the distribution of stimulus onset asynchronies. *Cognitive psychology*, *58*(3), 273-310.

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), Article 1. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

Montero-Odasso, M., Muir, S. W., & Speechley, M. (2012). Dual-Task Complexity Affects Gait in People With Mild Cognitive Impairment : The Interplay Between Gait Variability, Dual Tasking, and Risk of Falls. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *93*(2), Article 2. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.08.026

Müller, H., Baumeister, J., Bardal, E. M., Vereijken, B., & Skjæret-Maroni, N. (2023). Exergaming in older adults : The effects of game characteristics on brain activity and physical activity. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *15*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2023.1143859

Müller-Putz, G. R. (2020). Electroencephalography. *Handbook of clinical neurology*, *168*, 249-262.

Murray, E. G., Neumann, D. L., Moffitt, R. L., & Thomas, P. R. (2016). The effects of the presence of others during a rowing exercise in a virtual reality environment. *Psychology of Sport and Exercise*, *22*, 328-336. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2015.09.007

Nagai, K., Yamada, M., Tanaka, B., Uemura, K., Mori, S., Aoyama, T., Ichihashi, N., & Tsuboyama, T. (2012). Effects of Balance Training on Muscle Coactivation During Postural Control in Older Adults : A Randomized Controlled Trial. *The Journals of Gerontology: Series A*, *67*(8), 882-889. https://doi.org/10.1093/gerona/glr252

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

Nawaz, A., Skjæret, N., Helbostad, J. L., Vereijken, B., Boulton, E., & Svanaes, D. (2016). Usability and acceptability of balance exergames in older adults : A scoping review. *Health Informatics Journal*, *22*(4), 911-931. https://doi.org/10.1177/1460458215598638

Nawaz, A., Skjæret, N., Ystmark, K., Helbostad, J. L., Vereijken, B., & Svanæs, D. (2014). Assessing seniors' user experience (UX) of exergames for balance training. *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational*, 578-587. https://doi.org/10.1145/2639189.2639235

Neider, M. B., Gaspar, J. G., McCarley, J. S., Crowell, J. A., Kaczmarski, H., & Kramer, A. F. (2011). Walking and talking : Dual-task effects on street crossing behavior in older adults. *Psychology and aging*, *26*(2), 260.

Nelson, M. E., Rejeski, W. J., Blair, S. N., Duncan, P. W., Judge, J. O., King, A. C., Macera, C. A., & Castaneda-Sceppa, C. (2007). Physical activity and public health in older adults : Recommendation from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, *116*(9), 1094.

Netz, Y. (2019). Is There a Preferred Mode of Exercise for Cognition Enhancement in Older Age?—A Narrative Review. *Frontiers in Medicine*, *6*, 57. https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00057

Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann.

Niemann, C., Godde, B., & Voelcker-Rehage, C. (2014). Not only cardiovascular, but also coordinative exercise increases hippocampal volume in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00170

Nishiguchi, S., Yamada, M., Tanigawa, T., Sekiyama, K., Kawagoe, T., Suzuki, M., Yoshikawa, S., Abe, N., Otsuka, Y., Nakai, R., Aoyama, T., & Tsuboyama, T. (2015). A 12-Week Physical and Cognitive Exercise Program Can Improve Cognitive Function and Neural Efficiency in Community-Dwelling Older Adults : A Randomized Controlled Trial. *Journal of the American Geriatrics Society*, *63*(7), 1355-1363. https://doi.org/10.1111/jgs.13481

Noack, H., Lövdén, M., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2009). Cognitive plasticity in adulthood and old age : Gauging the generality of cognitive intervention effects. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *27*(5), 435-453. https://doi.org/10.3233/RNN-2009-0496

Nordin, E., Moe-Nilssen, R., Ramnemark, A., & Lundin-Olsson, L. (2010). Changes in step-width during dual-task walking predicts falls. *Gait & Posture*, *32*(1), 92-97. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.03.012

Norouzi, E., Vaezmosavi, M., Gerber, M., Pühse, U., & Brand, S. (2019). Dual-task training on cognition and resistance training improved both balance and working memory in older people. *The Physician and Sportsmedicine*, *47*(4), 471-478. https://doi.org/10.1080/00913847.2019.1623996

Norris, G., & Tate, R. L. (2000). The Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome (BADS) : Ecological, Concurrent and Construct Validity. *Neuropsychological Rehabilitation*, *10*(1), Article 1. https://doi.org/10.1080/096020100389282

Nouchi, R., Taki, Y., Takeuchi, H., Hashizume, H., Akitsuki, Y., Shigemune, Y., Sekiguchi, A., Kotozaki, Y., Tsukiura, T., Yomogida, Y., & Kawashima, R. (2012). Brain Training Game Improves Executive Functions and Processing Speed in the Elderly : A Randomized Controlled Trial. *PLoS ONE*, *7*(1), e29676. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029676

Nystoriak, M. A., & Bhatnagar, A. (2018). Cardiovascular Effects and Benefits of Exercise. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, *5*, 135. https://doi.org/10.3389/fcvm.2018.00135

Oberauer, K., Wendland, M., & Kliegl, R. (2003). Age differences in working memory—The roles of storage and selective access. *Memory & Cognition*, *31*(4), 563-569. https://doi.org/10.3758/BF03196097

Organisation Mondiale de la Santé. (2020). *Lignes directrices de l'OMS sur l'activité physique et la sédentarité : En un coup d'oeil*. https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity

Orr, R., Raymond, J., & Fiatarone Singh, M. (2008). Efficacy of Progressive Resistance Training on Balance Performance in Older Adults : A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Sports Medicine*, *38*(4), 317-343. https://doi.org/10.2165/00007256-200838040-00004

Oswald, W. D., Gunzelmann, T., Rupprecht, R., & Hagen, B. (2006). Differential effects of single versus combined cognitive and physical training with older adults : The SimA study in a 5-year perspective. *European Journal of Ageing*, *3*(4), Article 4. https://doi.org/10.1007/s10433-006-0035-z

Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., Howard, R. J., & Ballard, C. G. (2010). Putting brain training to the test. *Nature*, *465*(7299), 775-778.

Pacheco, T. B. F., de Medeiros, C. S. P., de Oliveira, V. H. B., Vieira, E. R., & de Cavalcanti, F. A. C. (2020). Effectiveness of exergames for improving mobility and balance in older adults : A systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews*, *9*(1), 163. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01421-7

Papp, K. V., Walsh, S. J., & Snyder, P. J. (2009). Immediate and delayed effects of cognitive interventions in healthy elderly : A review of current literature and future directions. *Alzheimer's & Dementia*, *5*(1), 50-60.

Park, D. C., Smith, A. D., Lautenschlager, G., Earles, J. L., Frieske, D., Zwahr, M., & Gaines, C. L. (1996). Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychology and Aging*, *11*(4), 621-637. https://doi.org/10.1037//0882-7974.11.4.621

Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks : Data and theory. *Psychological bulletin*, *116*(2), Article 2.

Paterson, D. H., & Warburton, D. E. (2010). Physical activity and functional limitations in older adults : A systematic review related to Canada's Physical Activity Guidelines. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, *7*(1), 38. https://doi.org/10.1186/1479-5868-7-38

Paul, P., Roy, D., Bhattacharya, P., Chatterjee, S., Paul, P., Roy, D., Bhattacharya, P., & Chatterjee, S. (2024). Team Sports and Executive Functions : A Comparative Observational Pilot Study. *Exercise Science*, *33*(1), 77-83.

Pedersen, M. T., Vorup, J., Nistrup, A., Wikman, J. M., Alstrøm, J. M., Melcher, P. S., Pfister, G. U., & Bangsbo, J. (2017). Effect of team sports and resistance training on physical function, quality of life, and motivation in older adults. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *27*(8), 852-864. https://doi.org/10.1111/sms.12823

Pellegrini-Laplagne, M., Dupuy, O., Sosner, P., & Bosquet, L. (2022). Effect of simultaneous exercise and cognitive training on executive functions, baroreflex sensitivity, and pre-frontal cortex oxygenation in healthy older adults : A pilot study. *GeroScience*. https://doi.org/10.1007/s11357-022-00595-3

Peng, H.-T., Tien, C.-W., Lin, P.-S., Peng, H.-Y., & Song, C.-Y. (2020). Novel Mat Exergaming to Improve the Physical Performance, Cognitive Function, and Dual-Task Walking and Decrease the Fall Risk of Community-Dwelling Older Adults. *Frontiers in Psychology*, *11*, 1620. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01620

Peng, W., Lin, J.-H., & Crouse, J. (2011). Is Playing Exergames Really Exercising? A Meta-Analysis of Energy Expenditure in Active Video Games. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *14*(11), 681-688. https://doi.org/10.1089/cyber.2010.0578

Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., Sloan, R., Gage, F. H., Brown, T. R., & Small, S. A. (2007). An *in vivo* correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(13), 5638-5643. https://doi.org/10.1073/pnas.0611721104

Perkins, D., & Salomon, G. (1999). *Transfer Of Learning*. *11*.

Perrier, C. (2021). Reconfigurations du mouvement sportif français face aux injonctions normatives du « sport-santé ». Le cas du « basket santé ». *SociologieS*. https://doi.org/10.4000/sociologies.15701

Perrochon, A., & Kemoun, G. (2014). The Walking Trail-Making Test is an early detection tool for mild cognitive impairment. *Clinical Interventions in Aging*, 111. https://doi.org/10.2147/CIA.S53645

Perrochon, A., Kemoun, G., Dugué, B., & Berthoz, A. (2014). Cognitive Impairment Assessment through Visuospatial Memory Can Be Performed with a Modified Walking Corsi Test Using the 'Magic Carpet'. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders Extra*, *4*(1), 1-13. https://doi.org/10.1159/000356727

Perrochon, A., Kemoun, G., Watelain, & Berthoz. (2013). Walking Stroop carpet : An innovative dual-task concept for detecting cognitive impairment. *Clinical Interventions in Aging*, 317. https://doi.org/10.2147/CIA.S38667

Perrot, A., Maillot, P., & Hartley, A. (2019). Cognitive Training Game Versus Action Videogame : Effects on Cognitive Functions in Older Adults. *Games for Health Journal*, *8*(1), 35-40. https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0010

Pesce, C. (2012). Shifting the Focus From Quantitative to Qualitative Exercise Characteristics in Exercise and Cognition Research. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *34*(6), 766-786. https://doi.org/10.1123/jsep.34.6.766

Pham, T. P., & Theng, Y.-L. (2012). *Game controllers for older adults : Experimental study on gameplay experiences and preferences*.

Pichierri, G., Murer, K., & De Bruin, E. D. (2012). A cognitive-motor intervention using a dance video game to enhance foot placement accuracy and gait under dual task conditions in older adults : A randomized controlled trial. *BMC Geriatrics*, *12*(1), 1-14. https://doi.org/10.1186/1471-2318-12-74

Picorelli, A., Sirineu, D., Felício, D., Anjos, D., Gomes, D., Dias, R., Pereira, L., & Guimarães Assis, M. (2014). Adherence of older women with strength training and aerobic exercise. *Clinical Interventions in Aging*, 323. https://doi.org/10.2147/CIA.S54644

Plummer, P., Eskes, G., Wallace, S., Giuffrida, C., Fraas, M., Campbell, G., Clifton, K.-L., & Skidmore, E. R. (2013). Cognitive-motor interference during functional mobility after stroke : State of the science and implications for future research. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *94*(12), Article 12. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.08.002

Plummer, P., Zukowski, L. A., Giuliani, C., Hall, A. M., & Zurakowski, D. (2015). Effects of physical exercise interventions on gait-related dual-task interference in older adults : A systematic review and meta-analysis. *Gerontology*, *62*(1), 94-117.

Podsiadlo, D., & Richardson, S. (1991). The Timed "Up & Go" : A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. *Journal of the American Geriatrics Society*, *39*(2), 142-148. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1991.tb01616.x

Pyae, A., Liukkonen, T. N., Mika, L., Kattimeri, C., & Smed, J. (2017). Investigating the Finnish elderly people's user experiences in playing digital game-based skiing exercise : A usability study. *Gerontechnology*, *16*(2), 65-80. https://doi.org/10.4017/gt.2017.16.2.002.00

Rahe, J., Petrelli, A., Kaesberg, S., Fink, G. R., Kessler, J., & Kalbe, E. (2015). Effects of cognitive training with additional physical activity compared to pure cognitive training in healthy older adults. *Clinical Interventions in Aging*, *10*, 297-311.

Raichlen, D. A., & Alexander, G. E. (2017). Adaptive Capacity : An Evolutionary Neuroscience Model Linking Exercise, Cognition, and Brain Health. *Trends in Neurosciences*, *40*(7), 408-421. https://doi.org/10.1016/j.tins.2017.05.001

Raichlen, D. A., Bharadwaj, P. K., Nguyen, L. A., Franchetti, M. K., Zigman, E. K., Solorio, A. R., & Alexander, G. E. (2020). Effects of simultaneous cognitive and aerobic exercise training on dual-task walking performance in healthy older adults : Results from a pilot randomized controlled trial. *BMC Geriatrics*, *20*(1), 83. https://doi.org/10.1186/s12877-020-1484-5

Raz, N. (2000). *Aging of the brain and its impact on cognitive performance : Integration of structural and functional findings*.

Rebsamen, S., Knols, R. H., Pfister, P. B., & de Bruin, E. D. (2019). Exergame-Driven High-Intensity Interval Training in Untrained Community Dwelling Older Adults : A Formative One Group Quasi- Experimental Feasibility Trial. *Frontiers in Physiology*, *10*, 1019. https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01019

Reichardt, C. S. (2002). *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference* . By William R. Shadish, Thomas D. Cook, and Donald T. Campbell. Boston : Houghton Mifflin, 2002. Pp. 623. $60.36 (paper). *Social Service Review*, *76*(3), 510-514. https://doi.org/10.1086/345281

Reitan, R. M. (1979). *Manual for administration and scoring of the Halstead–Reitan of neuropsychological test battery for adults and children*.

Renaud, M., Bherer, L., & Maquestiaux, F. (2010). A high level of physical fitness is associated with more efficient response preparation in older adults. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *65*(3), 317-322.

Rico-Olarte, C., Lopez, D. M., Eskofier, B. M., & Becker, L. (2025). Electrophysiological Insights in Exergaming—Electroencephalography Data Recording and Movement Artifact Detection : Systematic Review. *JMIR Serious Games*, *13*, e50992. https://doi.org/10.2196/50992

Riebe, D., Ehrman, J. K., Liguori, G., & Magal, M. (2018). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. American College of Sports Medicine. http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/5118

Rieker, J. A., Reales, J. M., Muiños, M., & Ballesteros, S. (2022). The Effects of Combined Cognitive-Physical Interventions on Cognitive Functioning in Healthy Older Adults : A Systematic Review and Multilevel Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *16*, 838968. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.838968

Rikli, R. E., & Jones, C. J. (1998). The reliability and validity of a 6-minute walk test as a measure of physical endurance in older adults. *Journal of aging and physical activity*, *6*(4), 363-375.

Rikli, R. E., & Jones, C. J. (1999). Development and Validation of a Functional Fitness Test for Community-Residing Older Adults. *Journal of Aging and Physical Activity*, *7*(2), 129-161. https://doi.org/10.1123/japa.7.2.129

Röglin, L., Martin-Niedecken, A. L., & Ketelhut, S. (2023). Exercising Digitally : A Multi-Perspective Analysis of Exergames for Physical Activity and Health Promotion. In A. L. Brooks (Éd.), *Creating Digitally* (Vol. 241, p. 79-116). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31360-8_4

Romera-Liebana, L., Orfila, F., Segura, J. M., Real, J., Fabra, M. L., Möller, M., Lancho, S., Ramirez, A., Marti, N., Cullell, M., Bastida, N., Martinez, D., Giné, M., Cendrós, P., Bistuer, A., Perez, E., Fabregat, M. A., & Foz, G. (2018). Effects of a Primary Care-Based Multifactorial Intervention on Physical and Cognitive Function in Frail, Elderly Individuals : A Randomized Controlled Trial. *The Journals of Gerontology: Series A*, *73*(12), 1668-1674. https://doi.org/10.1093/gerona/glx259

Rosado, H., Motta, P., Almeida, G., Cruz-Ferreira, A., & Pereira, C. (2025). Exploring the benefits of a psychomotor intervention mediated by creative dance in community-dwelling older adults : Development of new coordination and rhythm tests. *BMC Public Health*, *25*(1), 1780. https://doi.org/10.1186/s12889-025-21478-0

Roto, V. (2007). User experience from product creation perspective. *Towards a UX Manifesto*, *31*.

Roure, C., Fargier, P., Girod, G., Cécé, V., Pasco, D., & Lentillon-Kaestner, V. (2022). Exergaming in a Multiplayer and Inter-Team Competition Mode with Play Lü : Effects on Adolescents' Moderate-to-Vigorous Physical Activity and Situational Interest. *International Journal of Physical Activity and Health*, *1*(1), 3. https://doi.org/10.18122/ijpah1.1.3.boisestate

Roure, C., Lentillon-Kaestner, V., & Fargier, P. (2021). *Effets d'un affrontement inter-équipes avec le dispositif interactif Play Lü sur l'intérêt en situation et l'activité physique des adolescents*. https://orfee.hepl.ch/handle/20.500.12162/4972

Rowe, G., Hasher, L., & Turcotte, J. (2008). Age differences in visuospatial working memory. *Psychology and Aging*, *23*(1), Article 1. https://doi.org/10.1037/0882-7974.23.1.79

Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, *27*(4), 763.

Ryan, N. A., Zwetsloot, K. A., Westerkamp, L. M., Hickner, R. C., Pofahl, W. E., & Gavin, T. P. (2006). Lower skeletal muscle capillarization and VEGF expression in aged vs. Young men. *Journal of Applied Physiology*, *100*(1), 178-185. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00827.2005

Sala, G., Semir, K., & Gobet, F. (2021). Still No Evidence That Exergames Improve Cognitive Ability : A Commentary on Stanmore et al. (2017). *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *123*, 352-353. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.11.015

Salthouse, T. A. (1993). Speed and knowledge as determinants of adult age differences in verbal tasks. *Journal of Gerontology*, *48*(1), P29-36. https://doi.org/10.1093/geronj/48.1.p29

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

Salthouse, T. A. (2005). Relations between cognitive abilities and measures of executive functioning. *Neuropsychology*, *19*(4), 532.

Salthouse, T. A., & Babcock, R. L. (1991). Decomposing adult age differences in working memory. *Developmental psychology*, *27*(5), 763.

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*. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.838450

Schaefer, S. (2014). The ecological approach to cognitive–motor dual-tasking : Findings on the effects of expertise and age. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1167.

Schaefer, S., & Schumacher, V. (2011). The Interplay between Cognitive and Motor Functioning in Healthy Older Adults : Findings from Dual-Task Studies and Suggestions for Intervention. *Gerontology*, *57*(3), 239-246. https://doi.org/10.1159/000322197

Schättin, A., Arner, R., Gennaro, F., & de Bruin, E. D. (2016). Adaptations of Prefrontal Brain Activity, Executive Functions, and Gait in Healthy Elderly Following Exergame and Balance Training : A Randomized-Controlled Study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00278

Schmidt, R. A., & Bjork, R. A. (1992). New Conceptualizations of Practice : Common Principles in Three Paradigms Suggest New Concepts for Training. *Psychological Science*, *3*(4), Article 4. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00029.x

Schmiedek, F., Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2010). Hundred days of cognitive training enhance broad cognitive abilities in adulthood : Findings from the COGITO study. *Frontiers in aging neuroscience*, *2*, 27.

Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime reference guide*. Psychology Software Tools, Incorporated.

Schoene, D., Lord, S. R., Delbaere, K., Severino, C., Davies, T. A., & Smith, S. T. (2013). A Randomized Controlled Pilot Study of Home-Based Step Training in Older People Using Videogame Technology. *PLoS ONE*, *8*(3), e57734. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057734

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 and biobehavioral reviews*, *34*(5), 721-733. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005

Seldeen, K. L., Rahman, A. S., Redae, Y., Satchidanand, N., Mador, M. J., Ma, C., Soparkar, M., Lima, A. R., Ezeilo, I. N., & Troen, B. R. (2024). VO2MAX, 6-minute walk, and muscle strength each correlate with frailty in US veterans. *Frontiers in Physiology*, *15*, 1393221.

Sherrington, C., Fairhall, N., Wallbank, G., Tiedemann, A., Michaleff, Z. A., Howard, K., Clemson, L., Hopewell, S., & Lamb, S. (2020). Exercise for preventing falls in older people living in the community : An abridged Cochrane systematic review. *British journal of sports medicine*, *54*(15), 885-891.

Shimada, H., Uchiyama, Y., & Kakurai, S. (2003). Specific effects of balance and gait exercises on physical function among the frail elderly. *Clinical Rehabilitation*, *17*(5), 472-479. https://doi.org/10.1191/0269215503cr638oa

Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The Effects of Two Types of Cognitive Tasks on Postural Stability in Older Adults With and Without a History of Falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *52A*(4), M232-M240. https://doi.org/10.1093/gerona/52A.4.M232

Sinnemäki, J., Abrori, F., Prodromou, T., Lavicza, Z., Fenyvesi, K., & Jarvis, D. (2025). Exploring Educational Exergames in Wellbeing Education : A Study Finnish Primary School. *International Journal of Serious Games*, *12*, 103-120. https://doi.org/10.17083/ijsg.v12i1.869

Sipilä, S., Tirkkonen, A., Savikangas, T., Hänninen, T., Laukkanen, P., Alen, M., Fielding, R. A., Kivipelto, M., Kulmala, J., Rantanen, T., Sihvonen, S. E., Sillanpää, E., Stigsdotter Neely, A., & Törmäkangas, T. (2021). Effects of physical and cognitive training on gait speed and cognition in older adults : A randomized controlled trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *31*(7), 1518-1533. https://doi.org/10.1111/sms.13960

Smiley-Oyen, A. L., Lowry, K. A., Francois, S. J., Kohut, M. L., & Ekkekakis, P. (2008). Exercise, Fitness, and Neurocognitive Function in Older Adults : The "Selective Improvement" and "Cardiovascular Fitness" Hypotheses. *Annals of Behavioral Medicine*, *36*(3), Article 3. https://doi.org/10.1007/s12160-008-9064-5

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

Soares, V. N., Yoshida, H. M., Magna, T. S., Sampaio, R. A. C., & Fernandes, P. T. (2021). Comparison of exergames versus conventional exercises on the cognitive skills of older adults : A systematic review with meta-analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *97*, 104485. https://doi.org/10.1016/j.archger.2021.104485

Soltani, P., Figueiredo, P., & Vilas-Boas, J. P. (2020). Does exergaming drive future physical activity and sport intentions? *Journal of Health Psychology*, *26*, 2173-2185. https://doi.org/10.1177/1359105320909866

Spiteri, K., Broom, D., Hassan Bekhet, A., Xerri De Caro, J., Laventure, B., & Grafton, K. (2019). Barriers and Motivators of Physical Activity Participation in Middle-Aged and Older Adults—A Systematic Review. *Journal of Aging and Physical Activity*, *27*(6), 929-944. https://doi.org/10.1123/japa.2018-0343

Stanmore, E., Stubbs, B., Vancampfort, D., de Bruin, E. D., & Firth, J. (2017). The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations : A meta-analysis of randomized controlled trials. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *78*, 34-43. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.011

Stern, G., Psycharakis, S. G., & Phillips, S. M. (2023). Effect of High-Intensity Interval Training on Functional Movement in Older Adults : A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports medicine-open*, *9*(1), 5.

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. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, *47*(10), 2015-2028. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004

Sternin, A., Burns, A., & Owen, A. M. (2019). Thirty-Five Years of Computerized Cognitive Assessment of Aging—Where Are We Now? *Diagnostics*, *9*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/diagnostics9030114

Stojan, R., & Voelcker-Rehage, C. (2019). A Systematic Review on the Cognitive Benefits and Neurophysiological Correlates of Exergaming in Healthy Older Adults. *Journal of Clinical Medicine*, *8*(5), 734. https://doi.org/10.3390/jcm8050734

Strain, T., Flaxman, S., Guthold, R., Semenova, E., Cowan, M., Riley, L. M., Bull, F. C., & Stevens, G. A. (2024). National, regional, and global trends in insufficient physical activity among adults from 2000 to 2022 : A pooled analysis of 507 population-based surveys with 5· 7 million participants. *The Lancet Global Health*, *12*(8), e1232-e1243.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*(6), 643-662. https://doi.org/10.1037/h0054651

Suleiman-Martos, N., García-Lara, R., Albendín-García, L., Romero-Béjar, J. L., Cañadas-De La Fuente, G. A., Monsalve-Reyes, C., & Gomez-Urquiza, J. L. (2022). Effects of active video games on physical function in independent community-dwelling older adults : A systematic review and meta-analysis. *Journal of Advanced Nursing*, *78*(5), 1228-1244. https://doi.org/10.1111/jan.15138

Swain, D. P., ACSM, & Brawner, C. A. (2012). *ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams & Wilkins.

Taylor, L. M., Kerse, N., Frakking, T., & Maddison, R. (2018). Active Video Games for Improving Physical Performance Measures in Older People : A Meta-analysis. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, *41*(2), 108-123. https://doi.org/10.1519/JPT.0000000000000078

Temprado, J.-J. (2021). Can Exergames Be Improved to Better Enhance Behavioral Adaptability in Older Adults? An Ecological Dynamics Perspective. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *13*, 670166. https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.670166

Temprado, J.-J., Julien-Vintrou, M., Loddo, E., Laurin, J., & Sleimen-Malkoun, R. (2019). Cognitive functioning enhancement in older adults : Is there an advantage of multicomponent training over Nordic walking? *Clinical Interventions in Aging*, *Volume 14*, 1503-1514. https://doi.org/10.2147/CIA.S211568

Teraz, K., Šlosar, L., Paravlić, A. H., de Bruin, E. D., & Marusic, U. (2022). Impact of motor-cognitive interventions on selected gait and balance outcomes in older adults : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in psychology*, *13*, 837710.

Theill, N., Schumacher, V., Adelsberger, R., Martin, M., & Jäncke, L. (2013). Effects of simultaneously performed cognitive and physical training in older adults. *BMC Neuroscience*, *14*(1), 103. https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-103

Thin, A. G., Brown, C., & Meenan, P. (2013). User Experiences While Playing Dance-Based Exergames and the Influence of Different Body Motion Sensing Technologies. *International Journal of Computer Games Technology*, *2013*, 1-7. https://doi.org/10.1155/2013/603604

Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *29*(1), 3.

Toril, P., Reales, J. M., & Ballesteros, S. (2014). Video game training enhances cognition of older adults : A meta-analytic study. *Psychology and Aging*, *29*(3), 706-716. https://doi.org/10.1037/a0037507

Torre, M. M., Carrubba, C., Langeard, A., Hugues, N., Laurin, J., & Temprado, J.-J. (2024). Is an 8-week regimen of Nordic walking training sufficient to benefit cognitive performance in healthy older adults? A pilot study. *Journal of Clinical Medicine*, *13*(5), 1235.

Torre, M. M., & Temprado, J.-J. (2022). A Review of Combined Training Studies in Older Adults According to a New Categorization of Conventional Interventions. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *13*, 808539. https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.808539

Treisman, A. M. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, *76*(3), Article 3. https://doi.org/10.1037/h0027242

Troiano, R. P., Berrigan, D., Dodd, K. W., Masse, L. C., Tilert, T., & McDowell, M. (2008). Physical activity in the United States measured by accelerometer. *Medicine and science in sports and exercise*, *40*(1), 181.

Tsai, C.-L., Pan, C.-Y., Chen, F.-C., & Tseng, Y.-T. (2017). 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*, *9*, 294. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00294

Valenzuela, T., Okubo, Y., Woodbury, A., Lord, S. R., & Delbaere, K. (2018). Adherence to Technology-Based Exercise Programs in Older Adults : A Systematic Review. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, *41*(1), 49-61. https://doi.org/10.1519/JPT.0000000000000095

Van Der Linden, M., Brédart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British Journal of Psychology*, *85*(1), 145-152. https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1994.tb02514.x

van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *96*(23), Article 23. https://doi.org/10.1073/pnas.96.23.13427

Vaziri, D. D., Aal, K., Ogonowski, C., Von Rekowski, T., Kroll, M., Marston, H. R., Poveda, R., Gschwind, Y. J., Delbaere, K., Wieching, R., & Wulf, V. (2016). Exploring user experience and technology acceptance for a fall prevention system : Results from a randomized clinical trial and a living lab. *European Review of Aging and Physical Activity*, *13*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s11556-016-0165-z

Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology : Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, *27*(3), 425-478. https://doi.org/10.2307/30036540

Verghese, J., Kuslansky, G., Holtzer, R., Katz, M., Xue, X., Buschke, H., & Pahor, M. (2007). Walking While Talking : Effect of Task Prioritization in the Elderly. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *88*(1), Article 1. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.10.007

Verhaeghen, P., Steitz, D. W., Sliwinski, M. J., & Cerella, J. (2003). Aging and dual-task performance : A meta-analysis. *Psychology and Aging*, *18*(3), Article 3. https://doi.org/10.1037/0882-7974.18.3.443

Verrel, J., Lövdén, M., Schellenbach, M., Schaefer, S., & Lindenberger, U. (2009). Interacting effects of cognitive load and adult age on the regularity of whole-body motion during treadmill walking. *Psychology and Aging*, *24*(1), 75-81. https://doi.org/10.1037/a0014272

Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive Functions Predict the Success of Top-Soccer Players. *PLoS ONE*, *7*(4), e34731. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034731

Voelcker-Rehage, C. (2008). Motor-skill learning in older adults—A review of studies on age-related differences. *European Review of Aging and Physical Activity*, *5*(1), 5-16. https://doi.org/10.1007/s11556-008-0030-9

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., Godde, B., & Staudinger, U. M. (2011). Cardiovascular and Coordination Training Differentially Improve Cognitive Performance and Neural Processing in Older Adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*, 26. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00026

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), Article 9. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.028

Vorup, J., Pedersen, M. T., Melcher, P. S., Dreier, R., & Bangsbo, J. (2017). Effect of floorball training on blood lipids, body composition, muscle strength, and functional capacity of elderly men. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *27*(11), 1489-1499. https://doi.org/10.1111/sms.12739

Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(10), 525-544. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.001

Vrinceanu, T., Blanchette, C.-A., Intzandt, B., Lussier, M., Pothier, K., Vu, T. T. M., Nigam, A., Bosquet, L., Karelis, A. D., Li, K. Z. H., Berryman, N., & Bherer, L. (2021). A Comparison of the Effect of Physical Activity and Cognitive Training on Dual-Task Performance in Older Adults. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *77*(6), 1069-1079. https://doi.org/10.1093/geronb/gbab216

Walsh, V. (2014). Is sport the brain's biggest challenge? *Current Biology*, *24*(18), Article 18. https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.08.003

Wang, C.-H., Tsai, C.-L., Tu, K.-C., Muggleton, N. G., Juan, C.-H., & Liang, W.-K. (2015). Modulation of brain oscillations during fundamental visuo-spatial processing : A comparison between female collegiate badminton players and sedentary controls. *Psychology of Sport and Exercise*, *16*, 121-129. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2014.10.003

Wang, P., Liu, H.-H., Zhu, X.-T., Meng, T., Li, H.-J., & Zuo, X.-N. (2016). Action video game training for healthy adults : A meta-analytic study. *Frontiers in psychology*, *7*, 907.

Wang, R.-Y., Huang, Y.-C., Zhou, J.-H., Cheng, S.-J., & Yang, Y.-R. (2021). Effects of Exergame-Based Dual-Task Training on Executive Function and Dual-Task Performance in Community-Dwelling Older People : A Randomized-Controlled Trial. *Games for Health Journal*, g4h.2021.0057. https://doi.org/10.1089/g4h.2021.0057

Wechsler, D. (1997). *WMS-III : Wechsler memory scale administration and scoring manual* (Harcourt Brace&Co). The Psychological Corporation.

West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological bulletin*, *120*(2), 272.

Wild, K., Howieson, D., Webbe, F., Seelye, A., & Kaye, J. (2008). Status of computerized cognitive testing in aging : A systematic review. *Alzheimer's & Dementia*, *4*(6), Article 6. https://doi.org/10.1016/j.jalz.2008.07.003

Wollesen, B., Mattes, K., Schulz, S., Bischoff, L. L., Seydell, L., Bell, J. W., & von Duvillard, S. P. (2017). Effects of Dual-Task Management and Resistance Training on Gait Performance in Older Individuals : A Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 415. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00415

Wollesen, B., & Voelcker-Rehage, C. (2014). Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults : A systematic review. *European Review of Aging and Physical Activity*, *11*(1), Article 1. https://doi.org/10.1007/s11556-013-0122-z

Wollesen, B., Wildbredt, A., van Schooten, K. S., Lim, M. L., & Delbaere, K. (2020). The effects of cognitive-motor training interventions on executive functions in older people : A systematic review and meta-analysis. *European Review of Aging and Physical Activity*, *17*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s11556-020-00240-y

Wong, C. N., Chaddock-Heyman, L., Voss, M. W., Burzynska, A. Z., Basak, C., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Szabo-Reed, A. N., Phillips, S. M., & Wojcicki, T. (2015). Brain activation during dual-task processing is associated with cardiorespiratory fitness and performance in older adults. *Frontiers in aging neuroscience*, *7*, 154.

Wood, R. H., Reyes, R., Welsch, M. A., Favaloro-Sabatier, J., Sabatier, M., Matthew Lee, C., Johnson, L. G., & Hooper, P. F. (2001). Concurrent cardiovascular and resistance training in healthy older adults: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *33*(10), 1751-1758. https://doi.org/10.1097/00005768-200110000-00021

Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait : A review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, *16*(1), Article 1. https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4

Wüest, S., Borghese, N. A., Pirovano, M., Mainetti, R., van de Langenberg, R., & de Bruin, E. D. (2014). Usability and Effects of an Exergame-Based Balance Training Program. *Games for Health Journal*, *3*(2), 106-114. https://doi.org/10.1089/g4h.2013.0093

Yen, H.-Y., & Chiu, H.-L. (2021). Virtual Reality Exergames for Improving Older Adults' Cognition and Depression : A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Control Trials. *Journal of the American Medical Directors Association*, *22*(5), 995-1002. https://doi.org/10.1016/j.jamda.2021.03.009

Ylikoski, R., Ylikoski, A., Keskivaara, P., Tilvis, R., Sulkava, R., & Erkinjuntti, T. (1999). Heterogeneity of congnitive profiles in aging : Successful aging, normal aging, and individuals at risks for cognitive decline. *European Journal of Neurology*, *6*(6), 645-652. https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.1999.660645.x

Yokoyama, H., Okazaki, K., Imai, D., Yamashina, Y., Takeda, R., Naghavi, N., Ota, A., Hirasawa, Y., & Miyagawa, T. (2015). The effect of cognitive-motor dual-task training on cognitive function and plasma amyloid β peptide 42/40 ratio in healthy elderly persons : A randomized controlled trial. *BMC Geriatrics*, *15*(1), Article 1. https://doi.org/10.1186/s12877-015-0058-4

Zhu, X., Yin, S., Lang, M., He, R., & Li, J. (2016). The more the better? A meta-analysis on effects of combined cognitive and physical intervention on cognition in healthy older adults. *Ageing Research Reviews*, *31*, 67-79. https://doi.org/10.1016/j.arr.2016.07.003

Zimmermann, P., & Fimm, B. (1994). Tests d'évaluation de l'attention (TEA). *Würselen: Psytest*.

Zygouris, S., & Tsolaki, M. (2015). Computerized Cognitive Testing for Older Adults : A Review. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementiasr*, *30*(1), Article 1. https://doi.org/10.1177/1533317514522852

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Revue narrative publiée dans Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement

Annexe 2. Article publié dans Neurologie Psychiatrie Gériatrie

Annexe 3. Article publié dans GeroSciences

Annexe 4. Article relatif à l'étude 1 publié dans Behavioral Sciences

Annexe 5. Article relatif à l'étude 2 publié dans Experimental Aging Research

Annexe 6. Différences liées à l'âge entre les DTE cognitif et moteur (ANOVA) (étude 3)

Annexe 7. Analyses post hoc sur les différences d'âge entre la tâche physique et motrice sur le DTE autogénéré (étude 3)

Annexe 8. Différences liées à l'âge entre les tâches autogénérée et générée par l'environnement (ANOVA) (étude 3)

Annexe 9. Premier article relatif à l'étude 3 publié dans Games for Health

Annexe 10. Deuxième article relatif à l'étude 3 publié dans JMIR Serious Games

Annexe 11. Exercices des corps de séance d'AM2C (étude 4)

Annexe 12. Exercices de renforcement musculaire d'AM2C (étude 4)

Annexe 13. Échauffements du programme EM2I (étude 4)

Annexe 14. Description des jeux EM2I (étude 4)

Annexe 15. Complexifications des jeux EM2I (étude 4)

Annexe 16. Description des jeux SWITCH (étude 4)

Annexe 17. Complexifications des jeux SWITCH (étude 4)

Annexe 18. Codage des contrastes (étude 4)

Annexe 19. Traitements statistiques complémentaires pour les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests (étude 4)

Annexe 20. Différences en pré-tests entre les groupes (étude 4)

Annexe 21. Détails résultats post hoc pour l'effet de groupe au test 30 secondes assis-debout (étude 4)

Annexe 22. Détails résultats post hoc pour l'effet de groupe au DTE (tâche cognitive 2) (étude 4)

Annexe 23. Modèles de régression (capacités physiques) pour prédire les évolutions cognitives (étude 4)

Annexe 24. Modèles de régression (indicateurs programmes) pour prédire les évolutions cognitives (étude 4)

Annexe 25. Traitements statistiques complémentaires pour les comparaisons entre les pré-tests, les post-tests et les tests de rétention (étude 5)

Annexe 26. Différences en pré-tests entre les groupes pour les tests cognitifs, physiques et de DT (étude 5)

Annexe 27. Différences en pré-tests entre les groupes pour le questionnaire GLQ (étude 5)

Annexe 28. Comparaison post hoc pour l'effet de groupe (étude 5)

Annexe 1. Revue narrative publiée dans Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement

Repenser l'activité physique pour un vieillissement cognitif actif grâce aux exergames : une approche novatrice Rethinking Physical Activity for Active Cognitive Aging through Exergames: An Innovative Approach

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot. Repenser l'activité physique pour un vieillissement cognitif actif grâce aux exergames : une approche novatrice Rethinking Physical Activity for Active Cognitive Aging through Exergames: An Innovative Approach. Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement, 2025, 23 (2), 10.1684/pnv.2025.1230 . hal-05378683

HAL Id: hal-05378683
https://hal.science/hal-05378683v1

Submitted on 17 Dec 2025

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

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

Repenser l'activité physique pour un vieillissement cognitif actif grâce aux exergames : une approche novatrice

Rethinking Physical Activity for Active Cognitive Aging through Exergames: An Innovative Approach

BÉRAUD-PEIGNÉ Néva [1-2]

MAILLOT Pauline [2]

PERROT Alexandra [1]

[1] CIAMS, Université Paris Saclay, Orsay,France

[2] I3SP, Université Paris-Cité, Paris, France

Résumé. *Introduction.* Le vieillissement de la population française soulève de nouveaux défis. La recherche d'interventions efficaces pour préserver l'autonomie et diminuer le risque de troubles physiques et cognitifs représente une priorité. Plusieurs travaux ont suggéré que l'entraînement multi-domaine combinant stimulation physique, motrice et cognitive pourrait offrir des avantages pour maintenir la vitalité cognitive. Plus particulièrement, les exergames, jeux vidéo actifs, seraient susceptibles d'être le support d'entraînements efficaces.

But de l'étude et résultats. Cette revue narrative vise à établir un aperçu des effets de différents types de stimulations (aérobie, renforcement musculaire, habiletés motrices complexes, activités ouvertes, entraînement combiné) et des mécanismes associés, en se focalisant sur les jeux vidéo actifs ainsi qu'une nouvelle génération d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I).

Conclusions. Ces nouvelles technologies apparaissent comme des leviers motivationnels prometteurs pour l'entraînement multi-domaine (physique, moteur, cognitif) des personnes âgées.

Mots-clés : entraînement multi-domaine, cognition, personnes âgées, exergames.

Abstract. *Introduction*. The aging of the French population raises new challenges. The search for effective interventions to preserve autonomy and to decrease the risk of physical and cognitive disorders represents a priority. Several studies have suggested that multidomain training involving physical, motor, and cognitive stimulation could benefit maintaining cognitive vitality. In particular, exergames, active video games, could be effective for training purposes.

Purpose of research and results. This narrative review aims to provide an overview of the effects of different types of stimulation (aerobics, muscle strengthening, complex motor skills, open activities, combined training) and associated mechanisms, focusing on active video games as well as a new generation of exergames assisted by an immersive and interactive wall.

Conclusions. These new technologies are promising and motivational tools for multidomain training (i.e., physical, motor, cognitive) for older adults.

Keywords: multidomain training, cognition, older adults, exergames.

Introduction

L'espérance de vie s'allonge progressivement en France. En 2022, à 65 ans, elle s'élève à 84,2 ans pour les hommes et à 88,1 ans pour les femmes [1]. Néanmoins, ces années supplémentaires de vie ne sont pas toutes vécues en bonne santé, avec une différence entre l'espérance de vie avec et sans incapacités de neuf ans pour les hommes et 11,3 ans pour les femmes [1]. Le vieillissement démographique, et notamment l'augmentation du nombre de personnes âgées avec des troubles neurocognitifs implique de nouveaux défis pour la société, tels que maintenir la population active, participative et en bonne santé pendant une plus longue période. De nombreux chercheurs référents dans le domaine du bien vieillir, tels que Fissler [2], Herold [3], Kraft [4] et leurs collaborateurs ont un objectif commun : rechercher l'intervention optimale à travers la combinaison de stimulations physique et/ou motrice et/ou cognitive pour les personnes âgées. Effectivement, bien que les entraînements uni-modalités (e.g., activité physique seule) se révèlent efficaces, les entraînements combinés pourraient offrir des bénéfices physiques et cognitifs plus importants [5] grâce à l'effet de synergie [2]. La

stimulation cognitive consiste en la répétition d'exercices de difficulté croissante visant à solliciter une fonction cognitive spécifique ou un ensemble de processus cognitifs [6]. Elle peut être réalisée à l'aide de divers outils (e.g., logiciels, jeux vidéo), en laboratoire, dans une structure spécialisée ou à domicile. La stimulation physique désigne les mouvements corporels engendrés par la contraction des muscles squelettiques. Elle est généralement basée sur l'endurance et la résistance musculaire. L'endurance cible le système cardiovasculaire via des activités cycliques telles que la marche, la course et le cyclisme [7]. La résistance musculaire repose généralement sur des exercices effectués en utilisant le poids du corps, des poids libres ou des machines. La stimulation motrice consiste en la pratique de mouvements complexes, impliquant plusieurs articulations et segments corporels (e.g., bras, jambes, tronc), chacun ayant une liberté de mouvement dans plusieurs directions (e.g., flexion, extension, rotation) et nécessitant des processus attentionnels et exécutifs pour être élaborés et contrôlés avec précision [7]. Ces stimulations (i.e., cognitive, physique, motrice) sont catégorisées pour faciliter la compréhension, mais il est important de souligner que, lors de la pratique de l'activité physique, elles peuvent se produire simultanément, à des degrés variables. Par exemple, bien que la course à pied soit classée comme une « stimulation physique » en raison de son impact important sur le système cardiovasculaire, elle sollicite également le système moteur et les fonctions cognitives, bien que dans une moindre mesure. Il est donc plus pertinent de considérer ces différentes stimulations comme un continuum plutôt que comme une échelle dichotomique.

L'association des différentes modalités (e.g., physique, motrice, cognitive) forme des entraînements combinés, qui sont soit cognitivo-moteur, soit cognitivo-physique ou multi-domaine (cognitif, moteur et physique) (voir figure 1), pouvant générer des gains supérieurs à la pure addition des effets positifs des modalités [2]. Parallèlement, émergent de nouvelles technologies, tels que les exergames, jeux vidéo engendrant une stimulation physique, qui semblent être le support d'entraînements combinés efficaces [e.g., 8, 9]. Plus particulièrement, une nouvelle génération d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I) apparaît. Il s'avère nécessaire d'exposer ses caractéristiques, notamment par rapport aux exergames plus anciens, pour mieux cerner leurs similitudes et leurs différences.

Cette revue se concentre principalement sur l'activité physique et le vieillissement cognitif sain, dans une perspective de prévention. Certains aspects, tels que la stimulation cognitive, les effets physiques ou le vieillissement pathologique, ne sont volontairement pas abordés et/ou développés, par souci de concision. La première partie explore les effets du vieillissement cognitif, en mettant en lumière la présence d'une variabilité inter- et intra-individuelle. L'activité physique est présentée comme un levier essentiel pour ralentir les effets du vieillissement, avec des bénéfices spécifiques selon le type de pratique (aérobie, renforcement musculaire, habileté motrice, activité ouverte, stimulation sociale). La deuxième partie examine les modalités d'interventions optimales pour préserver les fonctions cognitives et physiques des personnes âgées. Elle insiste sur l'importance d'associer stimulations cognitive, physique et/ou motrice, en raison de leurs effets complémentaires et synergiques sur la plasticité cérébrale. L'entraînement simultané, notamment via les exergames, offre une approche innovante en combinant stimulation cognitive et physique et/ou motrice dans des tâches interactives et ludiques. Enfin, la dernière partie met en évidence les limites des exergames traditionnels et propose des solutions alternatives comme les exergames assistés par des murs immersifs et interactifs (EM2I). Ces dispositifs offrent des environnements plus immersifs, interactifs et socialement engageants, dont les caractéristiques spécifiques sont décrites. Étant donné le caractère émergent du sujet au moment de la réalisation de cet article, une revue narrative [10] a été effectuée. Les sources de cette revue non exhaustive proviennent de Google Scholar et Pubmed.

Le vieillissement cognitif

Un vieillissement enclin à la variabilité

Le vieillissement est un processus naturel, résultant des effets intrinsèques et extrinsèques que subit l'individu tout au long de sa vie. L'avancée en âge entraîne des conséquences complexes, hétérogènes et variables d'un individu à l'autre mais également selon les différentes fonctions de l'organisme. La variabilité intra-individuelle est particulièrement prononcée sur les capacités cognitives [11]. Alors que plusieurs capacités sont conservées, comme l'intelligence cristallisée, certaines fonctions cognitives sont singulièrement sensibles à l'avancée en âge. Les capacités visuospatiales

déclinent tout au long de l'âge adulte [12]. La vitesse de traitement de l'information est également une des fonctions les plus précocement affectées [13]. Le contrôle exécutif, quant à lui, faiblirait en premier [14]. En conséquence, les habiletés dépendantes, c'est-à-dire les fonctions exécutives, notamment la planification, l'inhibition, la flexibilité mentale et la mémoire de travail sont les plus fortement et précocement affectées par l'avancée en âge. Ces fonctions exécutives sont responsables de la planification, de l'organisation et de la synchronisation des actions complexes et permettent à l'individu de s'adapter à des situations inconnues, non routinières et de mettre en place de nouvelles stratégies. Leurs perturbations peuvent entraîner des conséquences négatives sur la capacité des personnes âgées à accomplir leurs tâches de la vie quotidienne [15].

L'évaluation cognitive des personnes âgées peut se faire par divers moyens. Le niveau cognitif global est évalué à l'aide d'échelles et de questionnaires cognitifs tels que le *Mini-Mental State Examination* (MMSE) [16] ou le *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA) [17]. Les fonctions cognitives spécifiques sont examinées plus précisément à l'aide de tests neuropsychologiques standardisés, comme le test de Stroop [18] pour évaluer l'inhibition ou le *Trail Making Test* [19] pour mesurer la flexibilité mentale. En complément, certaines méthodes d'imagerie permettent d'explorer l'activité et la structure cérébrale, comme l'IRM fonctionnelle (pour analyser l'activité cérébrale lors de tâches cognitives) et l'IRM structurelle (pour évaluer les modifications anatomiques), l'électroencéphalographie (EEG, pour enregistrer l'activité électrique cérébrale) ou encore la spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS, pour mesurer l'oxygénation cérébrale en temps réel).

Le déclin cognitif ne survient ni uniformément, ni simultanément chez tous les individus, reflétant l'existence d'une variabilité interindividuelle. L'hypothèse de l'enrichissement cognitif stipule que tous les comportements adoptés par un individu au cours de sa vie ont un impact significatif sur son fonctionnement cognitif, et ce, même à un âge avancé [20]. Les individus ont un potentiel d'amélioration (ou de déclin), qui apparaît sous l'influence de différents facteurs, appelés modérateurs (e.g., nombre d'années de scolarité, activités de loisirs stimulantes). Sachant que 40 % des troubles neurocognitifs dans le monde dépendent de facteurs de risque modifiables [21], la prévention revêt une importance cruciale.

La présence d'une variabilité inter- et intra-individuelle permet de reconsidérer l'idée anachronique d'un vieillissement exclusivement décadent. Face à l'accroissement de la population âgée, développer des stratégies pour préserver l'autonomie et diminuer le risque de troubles physiques et cognitifs représente une priorité [22]. Les effets de l'avancée en âge peuvent être modérés si certains comportements sont mis en place de manière adaptée [21]. Parmi eux, l'activité physique se distingue par son accessibilité et ses indéniables bénéfices cognitifs et physiques.

Impact des différentes activités physiques sur le vieillissement cognitif

Les effets de l'activité physique sur les capacités cognitives, physiques et fonctionnelles des personnes âgées sont importants. De nombreuses méta-analyses étayent ce phénomène [e.g., 23-25] et confirment la nécessité de l'engagement des seniors dans une pratique physique en faveur de leur santé cognitive. Pendant de nombreuses années, de multiples recherches se sont centrées sur l'activité physique aérobie du fait de sa potentielle prédominance sur l'amélioration des fonctions cognitives des personnes âgées. L'hypothèse métabolique suppose que l'activité physique aérobie entraînerait une amélioration de l'aptitude cardiovasculaire [26], générant une augmentation de la perfusion cérébrale et du flux sanguin régional, conduisant à l'apparition de nouveaux capillaires cérébraux (angiogenèse) dans les régions frontales. L'activité physique aérobie pourrait ainsi protéger, voire améliorer, l'intégrité hémodynamique des régions cérébrales particulièrement sensibles aux réductions du flux sanguin avec l'âge, et responsables des fonctions exécutives. Cela pourrait se traduire par une préservation ou une amélioration des performances cognitives au cours du vieillissement [27]. Cette oxygénation cérébrale peut également s'accompagner d'une augmentation de la neurogénèse (i.e., création de cellules nerveuses et neuronales) [27] par le biais de facteurs de croissance neurotrophiques (*Brain-Derived Neurotrophic Factor* - BDNF, *Insulin-like Growth Factor 1* - IGF1) dans l'hippocampe, siège de la mémoire. Erickson et ses collaborateurs [28] ont effectivement montré une augmentation de 2 % du volume de l'hippocampe et du taux de BDNF, associée à une amélioration des performances de la mémoire spatiale après avoir suivi un programme d'activité physique aérobie de 1 an. Néanmoins, plusieurs méta-analyses [23, 29] soulignent l'importance de s'intéresser aux effets spécifiques des différentes activités

physiques (e.g., aérobie, renforcement musculaire, habiletés motrices complexes, activités ouvertes). La condition physique est un concept multifacette qui englobe, en plus de l'endurance cardiorespiratoire (puissance aérobie), des composantes telles que l'endurance musculaire, la force et la puissance des muscles squelettiques, l'équilibre, la souplesse, la coordination et la motricité. Bien que les capacités physiques (cardiovasculaire, force musculaire) et motrices (vitesse de mouvement, équilibre, coordination motrice, souplesse) soient toutes les deux liées aux performances cognitives des seniors, elles provoquent des adaptations structurelles différentielles et sont reliées à des fonctions cognitives distinctes [30]. Une étude comparant un programme aérobie à un programme de coordination a montré que le premier augmentait l'activation des réseaux sensorimoteurs tandis que le second entraînait une plus grande stimulation des voies visuo-spatiales pendant un test des fonctions exécutives [31]. Cet entraînement moteur peut être médié par la stimulation d'habiletés motrices complexes. Particulièrement proches des activités de la vie quotidienne, elles encouragent ainsi le maintien de l'autonomie des plus âgés et permettraient de recourir fortement aux processus cognitifs de haut niveau, i.e., les fonctions exécutives. De plus, le caractère ouvert de certaines activités physiques (e.g., tennis de table, basket-ball, boxe) apparaît également pertinent. Prenant naissance d'un contexte dynamique, imprévisible et en constante évolution, les activités physiques ouvertes impliquent des charges et exigences physiques et cognitives importantes. Dans un objectif d'amélioration des fonctions cognitives, notamment à la fin de l'âge adulte, cela leur confère un avantage sur les activités physiques fermées (e.g., vélo, course à pied, natation) qui se déroulent dans un environnement prévisible et statique [32]. Le renforcement musculaire semble également être une modalité efficace pour améliorer les fonctions cognitives [33-35], permettant de médier l'expression de facteurs de croissance neurotrophiques [35]. Dès 2006, la méta-analyse d'Etnier et ses collaborateurs [29] suggérait que l'amélioration de la capacité aérobie n'expliquait pas la totalité de la variation cognitive des personnes âgées. Dans ce sens, Colcombe et Kramer [23] ont montré que les programmes excellant pour améliorer les fonctions cognitives étaient composés certes d'activité physique aérobie, mais qu'il était nécessaire de la combiner à du renforcement musculaire, de la souplesse et de l'équilibre. Torre et Temprado [7] soutiennent également la pertinence d'inclure des exercices sollicitant les habiletés motrices complexes, associées à une

stimulation de la filière aérobie et de la résistance musculaire. De plus, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande aux seniors la pratique d'une activité physique aérobie, de renforcement musculaire ainsi que d'activités physiques variées et à plusieurs composantes mettant l'accent sur l'équilibre fonctionnel et des exercices de force [36]. Enfin, la dimension sociale des différentes activités doit être prise en compte, notamment lorsqu'il s'agit de personnes âgées. La pratique collective, incluant la coopération et l'opposition, est encouragée par plusieurs chercheurs qui soulignent son intérêt sur l'aspect cognitif [37-40]. Une étude menée en 2022 [41] auprès de personnes âgées en bonne santé (MMSE moyen = 28/30), comparant un groupe suivant un programme de trois mois d'activités physiques basées sur la coopération et l'opposition à un groupe contrôle inactif, a mis en évidence des améliorations de la mémoire visuospatiale et de l'équilibre dynamique. En effet, l'engagement social semble renforcer l'efficacité de ces interventions [42].

L'activité physique conventionnelle présente des atouts majeurs pour améliorer les capacités cognitives des personnes âgées. Néanmoins, il est crucial d'élargir cette perspective en étudiant d'autres formes d'activités physiques, ainsi qu'en recherchant une combinaison optimale avec l'entraînement cognitif.

À la recherche de l'intervention idéale

Les interventions combinées

Les bénéfices des interventions isolées (e.g., activité physique seule, entraînement cognitif seul) sur les fonctions physiques et cognitives des personnes âgées ne sont plus à prouver [14, 28]. Mais l'entraînement physique seul pourrait ne pas être optimal pour retarder le déclin cognitif lié au vieillissement. Dans une perspective de conception de l'intervention idéale, Erickson et ses collaborateurs [43] insistent sur la nécessité de comprendre comment combiner au mieux l'entraînement cognitif à l'activité physique. Leur association peut avoir des effets synergiques et de ce fait, être plus efficiente [4] sur les fonctions cognitives. Effectivement, selon Fissler et al. [2], les activités physiques et cognitives pourraient influencer la plasticité cérébrale par des voies distinctes mais complémentaires grâce aux : i) effets de « facilitation » de l'activité physique ; et ii) effets d'« orientation » des exercices cognitifs. L'activité physique induirait des changements

neurophysiologiques (i.e., prolifération de cellules dans l'hippocampe [44], augmentation de la production de facteurs neurotrophiques, plasticité synaptique accrue [45]) qui pourraient faciliter la neuroplasticité (effet de « facilitation »). La stimulation cognitive, quant à elle, guiderait ces effets [2] en induisant des changements synaptiques et neuronaux [3, 46] favorisant la survie de nouvelles cellules induites par l'exercice [44] et la régulation des changements synaptiques (effet d'« orientation »). L'entraînement combiné peut s'effectuer en réalisant soit simultanément (i.e., entraînement simultané), soit séparément les tâches cognitives et physiques et/ou motrices (entraînement séquentiel) (figure 1). Néanmoins, les chercheurs soulignent la pertinence de la simultanéité [47, 48]. Les bénéfices des effets d'interaction se produiraient lors d'une fenêtre de temps restreinte, pendant l'entraînement et jusqu'à une heure après celui-ci. Toutefois, davantage d'études sont nécessaires pour confirmer cette temporalité [2, 48], qui serait liée à la libération transitoire de facteurs neurotrophiques après l'activité physique [49]. Cette simultanéité est d'autant plus bénéfique qu'elle place les participants en situation de double-tâche, ce qui favorisait, chez les personnes âgées, le transfert de leur apprentissage sur de nouvelles tâches [43, 46]. Néanmoins, les résultats concernant la supériorité de l'entraînement combiné sur les interventions conventionnelles restent encore controversés. Alors que plusieurs méta-analyses confirment que les effets de l'entraînement combiné sont supérieurs à ceux de l'activité physique seule sur les fonctions cognitives [5, 48, 50, 51], d'autres travaux infirment ces propos [52, 53]. Par exemple, Gavelin et ses collaborateurs [5] ont récemment réalisé une méta-analyse regroupant 47 essais contrôlés et randomisés menés auprès de participants principalement en bonne santé ou présentant des troubles cognitifs légers (MMSE moyen compris entre 23 et 29/30), âgés en moyenne de 65 à 87 ans. Ce travail montre que les entraînements combinés ont des effets significatifs modérés sur les fonctions cognitives (Hedges' g = 0,34), bien que ces effets soient très hétérogènes ($\tau 2$ = 0,29, I2 = 82 %). En revanche, la méta-analyse de Guo et ses collaborateurs [52] incluant 21 essais contrôlés et randomisés, réalisée auprès d'une population légèrement plus jeune, ne révèle pas de différence significative entre les effets de l'entraînement physique seul et ceux d'un entraînement combiné avec de la stimulation cognitive (différence moyenne standardisée = 0,13, 95% IC [(0,07, 0,33], $p > 0,05$) sur l'amélioration des fonctions exécutives. Selon Torre et Temprado [7], au-delà

des fonctions évaluées et de l'âge de la population, l'inconsistance des résultats entre les méta-analyses pourrait s'expliquer par la nécessité de distinguer les différentes stimulations physiques (i.e., motrice seule, physique seule, combinées) puisqu'elles peuvent entraîner des effets distincts. De plus, les modalités des tâches cognitives semblent fondamentales à examiner et approfondir. Par exemple, la stimulation cognitive par les jeux vidéo apparaît avantageuse face aux entraînements cognitifs conventionnels [54]. Devant la faiblesse des preuves concernant la supériorité des entraînements combinés face aux entraînements conventionnels, de nouvelles études doivent être conduites en prenant en compte les modalités des stimulations physiques, motrices et cognitives qui ont déjà montré des résultats. Ainsi, les exergames, jeux vidéo actifs, apparaissent être une solution intéressante, se traduisant par un nombre croissant de recherches depuis le début du XXI^{e} siècle [e.g., 55-57].

Les exergames : nouvelle perspective de l'entraînement combiné ?

L'incrémentation de la difficulté, la motivation, les feedbacks et les récompenses associées ainsi que la variabilité de la tâche sont des facteurs importants de programmes d'entraînement [54]. Autant de conditions que les exergames semblent remplir. De plus, ils apparaissent comme une alternative convaincante pour combiner les stimulations physique et cognitive (figure 1). D'une part, ils peuvent permettre d'offrir une stimulation physique complète. D'autre part, la sollicitation cognitive continue est pertinente pour les personnes âgées. Les défis cognitifs des exergames sont directement intégrés dans des activités physiques réalistes, tout en fournissant un retour virtuel. Cette approche *Moving While Thinking* (i.e., bouger en pensant [3]), qui fait de la résolution de la tâche cognitive un prérequis constitutif de l'action cognitivo-motrice, est prometteuse. L'approche inverse *Thinking While Moving* (i.e., penser en bougeant) soumet le participant à deux tâches qui ne sont pas liées (e.g., pédaler et réaliser des opérations mathématiques). L'interactivité entre les deux domaines (*Moving While Thinking*) entraînerait des bénéfices cognitifs plus importants chez les personnes âgées [3]. Adcock et ses collaborateurs [58] soulignent également le besoin d'une interaction continue avec l'environnement qui sollicite les systèmes cognitifs, physiques et sensoriels pour prévenir les déclins liés à l'âge et maintenir la santé cérébrale. De plus, le caractère ouvert de la majorité des exergames leur confère une qualité additionnelle. Le joueur doit planifier,

prendre des décisions et en inhiber d'autres afin d'interpréter correctement les stimuli à l'origine de ses mouvements et déplacements dans l'environnement virtuel, sollicitant hautement les fonctions exécutives [59]. Ces activités ouvertes sont enclines à la variabilité et offrent une diversité dans les tâches d'entraînement et dans les types d'interactions proposées [26, 60]. Ainsi, la variabilité proposée aux personnes âgées amplifie les apprentissages et leurs transferts [61] grâce aux stimuli offerts par les jeux vidéo, améliorant les fonctions exécutives [59]. Cela suggère que les gains sont plus importants si le programme est associé à une variété de combinaisons de processus impliqués [54]. Effectivement, Fissler et al. stipulent que les « nouvelles interventions » (e.g., cours d'informatique, jeux vidéo stratégiques, débats sociaux, jeux de sociétés et de cartes), qui sont inédites et calibrées de manière optimale en termes de difficulté, associées à une haute variabilité de la tâche d'entraînement, stimulent des processus larges et permettent de générer des effets sur les habiletés cognitives non spécifiques. De plus, si cette richesse est couplée à une stimulation physique, comme c'est le cas avec les exergames, les effets sur les fonctions cognitives seraient décuplés. Grâce à un effet synergique des deux modalités, cela entraînerait des transferts moins spécifiques aux tâches entraînées et donc à des habiletés cognitives plus générales [2].

Face à ces caractéristiques originales, les études se sont multipliées afin de tester les effets des exergames chez les personnes âgées. Leurs bénéfices sur les fonctions cognitives [8, 9, 62, 63] et physiques [9, 64-66] font l'objet d'expérimentations prometteuses. Par exemple, la méta-analyse de Jiang et al. [62] indique que les exergames améliorent les fonctions exécutives, évaluées à l'aide de tests neuropsychologiques. Plus précisément cela concerne l'inhibition (différence moyenne standardisée = 0,415, IC 95% [0,102-0,729], p = 0,009), la flexibilité mentale (différence moyenne standardisée = 0,243, IC 95% [0,071-0,415], p = 0,005) et la mise à jour de la mémoire de travail (différence moyenne standardisée = 0,366, IC 95% [0,140-0,592], p = 0,002) par rapport à un groupe contrôle (actif ou inactif). Concernant les aspects physiques, la méta-analyse de Fang et al. [64] s'est concentrée sur l'évaluation de six variables d'équilibre (tous les résultats ne sont pas détaillés ici). Elle révèle que, comparativement à un groupe contrôle (inactif, activité physique ou exercices cognitifs), les exergames améliorent l'équilibre dynamique, évalué par le TUG (Hedges' g = 0,36,

IC 95% = 0,26-1,30, p < 0,001), l'équilibre perçu (Hedges' g = 0,31, IC 95% = 0,04-0,58, p = 0,02) ou encore le test assis debout (Hedges' g = 0,78, IC 95% = 0,26-1,30, p = 0,003). En revanche, aucun effet n'a été observé pour l'équilibre statique (Hedges' g = 0,22, IC 95% = (0,31-0,76, p = 0,42). De plus, le plaisir procuré par les exergames est avantageux [67]. Ils encouragent les joueurs à faire des mouvements au-delà des exigences du jeu [68] et entraînent une adhésion plus élevée face aux programmes sans technologies [69]. Ainsi, dans un objectif de transfert vers la vie quotidienne et d'adhésion à l'activité physique, les exergames pourraient s'imposer comme des outils qualitatifs pour l'entraînement des fonctions cognitives des personnes âgées. Cependant, le caractère récent de ces travaux n'offre pas un niveau de preuve suffisant, en particulier concernant le débat quant à leur supériorité par rapport aux interventions conventionnelles et/ou combinées.

Vers la conception de nouveaux exergames

Inconsistance des résultats des programmes d'exergames

Les exergames présentent des atouts dans une perspective d'amélioration des fonctions cognitives par l'entraînement multi-domaine. D'autant plus lorsque le programme propose un environnement socialement challengeant et attractif comme les exergames, les stimulations physiques et cognitives simultanées devraient engendrer davantage de bénéfices qu'un entraînement simple [6]. Néanmoins, leur hégémonie comparativement à des interventions conventionnelles fait débat. Bien qu'ils seraient plus efficaces que les programmes conventionnels [8, 9, 46, 63] et ceux combinant activité physique et motrice sur la flexibilité mentale [70], le niveau cognitif global [71] et sur les capacités de double tâche [72], les niveaux de preuves sont faibles et les revues et méta-analyses [8, 9, 63] déplorent une grande hétérogénéité, se répercutant négativement sur les résultats. De plus, plusieurs travaux n'ont pas montré de supériorité des exergames face aux programmes conventionnels [5, 57, 73-75] voire les ont montrés inefficaces [8, 9]. Ces résultats contradictoires ont pu naître de la faiblesse des demandes physiques, motrices et cognitives de certains exergames comparés aux entraînements conventionnels. Effectivement, si l'intensité physique est un vecteur central, certains types d'exergames ne semblent pas permettre de suivre les

recommandations d'une intensité au moins modérée [76]. De plus, alors que les modifications de la forme cardio-respiratoire et de la force musculaire sont une condition préalable à l'analyse des modifications cognitives étant donné qu'elles sont au moins en partie suscitées par leur amélioration, peu d'études s'y sont intéressées. Quelques exceptions rapportent un progrès faible des performances physiques, suggérant le manque de charge de l'entraînement en exergames sur les capacités métaboliques [56, 77-79]. Il est envisageable qu'il n'y ait pas eu d'exploitation totale de la synergie entre les effets de facilitation et de guidage, considérée comme une condition élémentaire pour observer des bénéfices cognitifs lorsque des exercices aérobies et cognitifs sont associés. Alors que d'autres modalités de pratique ont montré leurs bénéfices (e.g., renforcement musculaire, habiletés motrices complexes), les exergames sont souvent uniquement associés à de l'activité physique aérobie. Barnes [80] suggère ainsi de proposer des exercices qui sollicitent l'apprentissage, la coordination, plusieurs groupes musculaires et une stimulation cognitive continue. Bien que la ludification puisse faciliter la conception d'interventions motivant le changement de comportement [81], il faut s'assurer que les exigences cognitives et physiques soient au minimum tout aussi stimulantes que les exercices plus traditionnels. Face aux limites présentées, il apparaît nécessaire de déployer des études avec des protocoles rigoureux (essais contrôlés et randomisés) pour clarifier et contrôler l'impact des différents paramètres sur l'efficacité des exergames [82], notamment avec le développement croissant de nouveaux outils.

Des exergames assistés par des murs interactifs et immersifs

Les recherches sur les exergames se sont condensées sur l'évaluation d'une première génération (e.g., Wii®, Xbox®, Kinect®), alors qu'une nouvelle catégorie (figure 2) d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I) se développe depuis quelques années (e.g., Lumo Play, Motion Magix, Play Lü, Vertigo Système, Iwall, ExerCube, Neo One). Ils sont imposants (plusieurs mètres de haut), immersifs et apportent des interactions sociales intéressantes entre les joueurs. Ces nouveaux exergames ont fait l'objet de très peu d'études, hormis les exceptions réalisées avec le dispositif Play Lü [83, 84], ExerCube [78, 85] et Neo One [86, 87]. En 2024, une première étude interventionnelle auprès de personnes âgées en bonne santé (âge moyen = 70 ans, MMSE moyen = 29/30) a été menée, comparant les effets d'un programme de trois mois

d'EM2I à ceux d'un programme de marche et de renforcement musculaire [87]. Le groupe EM2I a bénéficié d'une amélioration comparable dans un large éventail de capacités physiques. En revanche, il y a eu une progression plus importante pour la mémoire de travail visuospatiale ($p = 0,01$, $\eta 2 = 0,04$) évaluée à l'aide du test de Corsi, une des dimensions de l'échelle de mémoire de Wechsler [88], l'inhibition ($p = 0,01$, $\eta 2 = 0,03$), mesurée par le test de Stroop [18] et de la performance en double tâche, par rapport au groupe de marche et renforcement musculaire. De plus, le plaisir perçu était significativement plus élevé pour le groupe EM2I que pour le groupe ayant suivi le programme conventionnel.

Les EM2I possèdent des caractéristiques spécifiques avantageuses, schématisées à travers la figure 3, offrant un entraînement multi-domaine mêlant stimulations naturelles et virtuelles : i) immersion grâce à la virtualité ; ii) stimulation physique importante ; iii) activité motrice complexe ; iv) sollicitation cognitive puissante ; v) interactions sociales multiples.

Comparativement aux exergames conventionnels, les EM2I sont pourvus de capacités immersives plus conséquentes qui offrent un environnement potentiellement adéquat aux participants afin d'être totalement imprégnés dans la séance. Quand la Wii® ou la Xbox® sont généralement reliées à un écran de télévision, les EM2I sont projetés sur des murs. Ils ne possèdent ni casque ni équipement, une solution de taille face aux répercussions négatives que peuvent avoir les casques de réalité virtuelle, avec notamment l'apparition de nausées, vertiges et malaises. Hormis le fait que l'immersion puisse augmenter l'intensité de la séance [89], provoquer une perception de l'effort plus faible [85] et générer de meilleures performances [90], elle amplifierait l'activité des régions cérébrales associées notamment aux fonctions exécutives [91]. Selon Temprado [75], l'inconsistance des résultats sur les effets cognitifs des programmes d'exergames pourrait être causée par une sous-exploitation de l'immersion alors que la virtualité et les environnements immersifs engendreraient une stimulation et une adaptation très intéressante des comportements perceptivo-moteurs des participants. Ainsi, Huang [92] propose de combiner exergames et environnements virtuels immersifs afin d'augmenter l'efficience des entraînements sur la santé cérébrale. Les EM2I pourraient ainsi être de

bons compromis pour augmenter l'efficience de l'entraînement multi-domaine sans générer d'événements négatifs.

Ces nouveaux exergames pourraient induire une intensité physique plus élevée que leurs homologues. Une récente étude réalisée avec le dispositif Play Lü [83] démontre qu'il génère une intensité modérée à élevée, mesurée à l'aide d'accéléromètres, chez des adolescents. De même, le mur interactif et immersif Neo One produit une intensité modérée à élevée chez les personnes âgées [86, 87] mesurée grâce à des cardiofréquencemètres. Cette intensité correspond à la cible recommandée par l'American College of Sports Medicine (ACSM) [93] pour favoriser des bénéfices sur les fonctions cognitives. Un tel niveau d'intensité peut s'expliquer d'une part par la taille de l'aire de jeu plus étendue que celle des exergames conventionnels, laissant place à une liberté de mouvements qui incitent à la dépense énergétique. D'autre part, les EM2I donnent lieu à une sollicitation du corps entier alors qu'une stimulation disparate composée uniquement de mouvements d'une partie du corps entraînerait des effets plus faibles sur l'intensité des séances et ses bénéfices [76]. Pour ajouter à cela, les joueurs d'EM2I ne peuvent pas adopter de stratégies d'économie d'énergie et sont inconsciemment contraints de réaliser des mouvements toujours aussi complexes au fil des séances, utilisant l'ensemble du corps pour atteindre leur but (e.g., utiliser le haut du corps pour lancer la balle, se déplacer rapidement pour toucher les cibles, se baisser pour récupérer les balles au sol).

En ce qui concerne le plan moteur, les EM2I entraînent des mouvements faisant appel aux habiletés motrices générales, ayant la capacité d'augmenter l'intensité physique [94]. Ils encouragent la coordination, l'équilibre dynamique ainsi que la souplesse à travers une grande liberté de mouvement. Ils ont également une validité écologique, par leur similitude avec les activités de la vie quotidienne, ce qui augmente les effets de transfert [3] et permet de lutter contre le phénomène de « posture first » qui incite les personnes âgées à privilégier leur équilibre et leur posture au détriment de la réalisation de la tâche cognitive.

Au niveau cognitif, les EM2I offrent une stimulation cognitive continue, engageant une concentration mentale plus élevée qu'un entraînement physique conventionnel [95].

Les effets des exergames sur la cognition dépendent fortement de la demande cognitive de l'environnement ludique et l'ajout de stimulation cognitive intense potentialise les effets sur la cognition [50]. Ces exigences cognitives générées par les EM2I sont d'autant plus importantes qu'elles prennent naissance par des jeux sollicitant des processus cognitifs très divers, et ce, de manière concomitante. Par exemple, les joueurs sont amenés à retenir des informations afin d'être les plus efficaces possible (i.e., mémoire à court terme et de travail), passer rapidement d'une information à une autre (i.e., flexibilité mentale), combiner une action motrice à une tâche cognitive (i.e., double tâche) au même titre que planifier leur action et mettre en place des stratégies (i.e., planification), ne pas prendre en compte certaines informations pour se concentrer sur celles essentielles (i.e., inhibition) tout cela en analysant de multiples informations visuospatiales (i.e., fonctions visuospatiales). Les exigences cognitives sont créées par le système (e.g., trouver la bonne cible puis lancer la balle au bon endroit et au bon moment) mais également par des interactions sociales sous-jacentes aux jeux (e.g., coopérer avec son équipe pour obtenir plus de points que l'équipe adverse).

Alors que la Wii® et la Kinect® se jouent généralement à deux joueurs maximum, certains EM2I peuvent accueillir une dizaine de participants, incitant naturellement à des situations de coopération et/ou d'opposition. Les EM2I encouragent les participants à communiquer pour mettre en place des stratégies et planifier ensemble les actions à réaliser lors des jeux. Ces activités ont déjà montré des résultats encourageants [86, 87] sur l'amélioration des fonctions cognitives des personnes âgées. Les exergames collectifs permettent également d'obtenir une intensité plus élevée [83] et de meilleurs résultats sur l'amélioration des capacités fonctionnelles des personnes âgées [96] comparés aux exergames pratiqués seuls. Ainsi, les exergames assistés par des murs immersifs et interactifs semblent être une option prometteuse, présentant des modalités manifestes pour contrer les limites des entraînements combinés conventionnels (i.e., activités fermées, non interactives, individuelles) et des exergames conventionnels (i.e., manque d'intensité physique et cognitive, faible immersion). Par ailleurs, en raison de leur coût élevé par rapport aux exergames conventionnels et de la taille imposante des dispositifs, les EM2I ne sont pas adaptés à une acquisition individuelle ni à une pratique à domicile. Leur utilisation s'adresse davantage aux collectivités ou aux structures

accueillant du public (e.g., association, club, Maison Sport Santé) qui peuvent équiper leurs locaux de ces dispositifs. La pratique, comme tout autre activité physique, peut être libre ou encadrée en fonction des besoins du public cible. Ainsi, la technologie ne se substitue pas nécessairement à l'intervention humaine et peut nécessiter un encadrement par un professionnel de l'activité physique adaptée (e.g., enseignant en activité physique adaptée), au moins initial, pour une utilisation optimale et sécuritaire. Compte tenu de leur récent développement, le déploiement et l'évaluation des EM2I en sont encore à leurs prémices.

Points clés

- Face au vieillissement de la population, développer des stratégies pour préserver l'autonomie et réduire le risque de troubles physiques et cognitifs constitue une priorité.
- Des programmes d'exergames, jeux vidéo actifs, sont utilisés pour améliorer les fonctions physiques et cognitives des personnes âgées.
- Une nouvelle génération d'exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I) offre un entraînement multidomaine mêlant stimulations naturelles et virtuelles : i) immersion grâce à la virtualité ; ii) stimulation physique importante ; iii) activité motrice complexe ; iv) sollicitation cognitive ; v) interactions sociales multiples.

Conclusion

Malgré les bénéfices connus de l'activité physique, le vieillissement peut s'accompagner de l'adoption de comportements sédentaires et d'inactivité physique [97]. Le manque d'envie et d'accessibilité des pratiques font notamment parties des barrières de l'engagement dans un style de vie actif [98, 99]. Les EM2I, nouvelle génération d'exergames prometteuses, en plus de lever ces freins à la pratique physique, pourraient offrir un accès privilégié à un entraînement multi-domaine. La sollicitation physique soumet idéalement les personnes à des stimulations complexes et variées (i.e., aérobie, renforcement musculaire, équilibre, souplesse, coordination, habiletés motrices complexes) quand la stimulation cognitive profite des bénéfices des jeux vidéo

(i.e., variabilité, attractivité, plaisir) et de la virtualité (i.e., immersion). Ces deux modalités physiques et cognitives ont la particularité d'être incorporées l'une dans l'autre, bénéficiant des effets de l'entraînement interactif *Moving While Thinking*. A cela s'ajoute l'avantage de la sollicitation sociale (i.e., coopération, opposition). De futures études devraient s'intéresser à cette singularité de l'exergaming qui semble fécond pour promouvoir la pratique d'activité physique chez les personnes âgées avec pour finalité l'augmentation de la qualité de vie. Liens d'intérêts : Les autrices déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts en rapport avec cet article.

Références

1. Drees. Études et Résultats - L'espérance de vie sans incapacité à 65 ans est de 11,8 ans pour les femmes et de 10,2 ans pour les hommes en 2022 - numéro 1290 2023.

2. Fissler P, Küster O, Schlee W, Kolassa I-T. Novelty Interventions to Enhance Broad Cognitive Abilities and Prevent Dementia. Prog Brain Res 2013 ; 207 : 403-34.

3. Herold F, Hamacher D, Schega L, Müller NG. Thinking While Moving or Moving While Thinking - Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. Front Aging Neurosci 2018 ; 10 : 228.

4. Kraft E. Cognitive function, physical activity, and aging: Possible biological links and implications for multimodal interventions. Aging Neuropsychol Cogn 2012 ; 19 : 248-63.

5. Gavelin HM, Dong C, Minkov R, et al. Combined physical and cognitive training for older adults with and without cognitive impairment: A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. Ageing Res Rev 2021 ; 66 : 101232.

6. Bamidis PD, Vivas AB, Styliadis C, et al. A review of physical and cognitive interventions in aging. Neurosci Biobehav Rev 2014 ; 44 : 206-20.

7. Torre MM, Temprado JJ. A Review of Combined Training Studies in Older Adults According to a New Categorization of Conventional Interventions. Front Aging Neurosci 2022 ; 13 : 808539.

8. Stanmore E, Stubbs B, Vancampfort D, Bruin ED de, Firth J. The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations: A meta-analysis of randomized controlled trials. Neurosci Biobehav Rev 2017 ; 78 : 34-43.

9. Howes SC, Charles DK, Marley J, Pedlow K, McDonough SM. Gaming for Health: Systematic Review and Meta-analysis of the Physical and Cognitive Effects of Active Computer Gaming in Older Adults. Phys Ther 2017 ; 97 : 1122-37.

10. Nambiema A, Fouquet J, Guilloteau J, Descatha A. La revue systématique et autres types de revue de la littérature : qu'est-ce que c'est, quand, comment, pourquoi ? Arch Mal Prof Environ 2021 ; 82 : 539-52.

11. Baltes PB, Willis SL. Plasticity and Enhancement of Intellectual Functioning in Old Age. In : Craik FIM, Trehub S, eds. Aging and Cognitive Processes. Boston, MA : Springer US, 1982 : 353-89.

12. Koss E, Haxby JV, DeCarli C, Schapiro MB, Friedland RP, Rapoport SI. Patterns of performance preservation and loss in healthy aging. Dev Neuropsychol 1991 ; 7 : 99-113.

13. Garcia-Cabello E, Gonzalez-Burgos L, Pereira JB, et al. The Cognitive Connectome in Healthy Aging. Front Aging Neurosci 2021 ; 13.

14. Raz N. Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings 2000.

15. Amieva H, Phillips L, Della Sala S. Behavioral dysexecutive symptoms in normal aging. Brain Cogn 2003 ; 53 : 129-32.

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

17. Nasreddine ZS, Phillips NA, Bédirian V, et al. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment. J Am Geriatr Soc 2005 ; 53 : 695-9.

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

19. Reitan RM. Manual for administration and scoring of the Halstead-Reitan neuropsychological test battery for adults and children. 1979.

20. Greenwood PM, Parasuraman R. Neuronal and Cognitive Plasticity: A Neurocognitive Framework for Ameliorating Cognitive Aging. Front Aging Neurosci 2010 ; 2.

21. Livingston G, Huntley J, Sommerlad A, et al. Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission. The Lancet 2020 ; 396 : 413-46.

22. Winblad B, Amouyel P, Andrieu S, et al. Defeating Alzheimer's disease and other dementias: a priority for European science and society. Lancet Neurol 2016 ; 15 : 455-532.

23. Colcombe S, Kramer AF. Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta-Analytic Study. Psychol Sci 2003 ; 14 : 125-30.

24. Xu L, Gu H, Cai X, et al. The Effects of Exercise for Cognitive Function in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Int J Environ Res Public Health 2023 ; 20 : 1088.

25. Young J, Angevaren M, Rusted J, Tabet N. Aerobic exercise to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. Cochrane Database Syst Rev 2015.

26. Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, et al. Ageing, fitness and neurocognitive function. Nature 1999 ; 400 : 418-9.

27. Audiffren M, André N, Albinet C. Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors : bilan et perspectives. Rev Neuropsychol 2011 ; 3 : 207-25.

28. Erickson KI, Voss MW, Prakash RS, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. Proc Natl Acad Sci 2011 ; 108 : 3017-22.

29. Etnier JL, Nowell PM, Landers DM, Sibley BA. A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. Brain Res Rev 2006 ; 52 : 119-30.

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

31. Voelcker-Rehage C, Godde B, Staudinger UM. Cardiovascular and Coordination Training Differentially Improve Cognitive Performance and Neural Processing in Older Adults. Front Hum Neurosci 2011 ; 5 : 26.

32. Gu Q, Zou L, Loprinzi PD, Quan M, Huang T. Effects of Open Versus Closed Skill Exercise on Cognitive Function in Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. J Geriatr Phys Ther 2018 ; 41 : 108-23.

33. 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 ; 2013 : 1-8.

34. 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 Res Rev 2014 ; 16 : 12-31.

35. Marston KJ, Peiffer JJ, Rainey-Smith SR, et al. Resistance training enhances delayed memory in healthy middle-aged and older adults: A randomised controlled trial. J Sci Med Sport 2019 ; 22 : 1226-31.

36. Organisation Mondiale de la Santé. Lignes directrices de l'OMS sur l'activité physique et la sédentarité: En un coup d'œil. 2020.

37. Audiffren M, André N, Albinet C. Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors : bilan et perspectives. Rev Neuropsychol 2011 ; 3 : 207-25.

38. Elferink-Gemser MT, Faber IR, Visscher C, Hung T-M, Vries SJ de, Nijhuis-Van der Sanden MWG. Higher-level cognitive functions in Dutch elite and sub-elite table tennis players. PLOS ONE 2018 ; 13 : e0206151.

39. Vestberg T, Gustafson R, Maurex L, Ingvar M, Petrovic P. Executive Functions Predict the Success of Top-Soccer Players. PLoS ONE 2012 ; 7 : e34731.

40. Voelcker-Rehage C, Godde B, Staudinger UM. Cardiovascular and Coordination Training Differentially Improve Cognitive Performance and Neural Processing in Older Adults. Front Hum Neurosci 2011 ; 5 : 26.

41. Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées. NPG Neurol - Psychiatr - Gériatrie 2022 ; 22 : 149-57.

42. Amieva H, Stoykova R, Matharan F, Helmer C, Antonucci TC, Dartigues JF. What Aspects of Social Network Are Protective for Dementia? Psychosom Med 2010 ; 72 : 905-11.

43. Erickson KI, Hillman CH, Kramer AF. Physical activity, brain, and cognition. Curr Opin Behav Sci 2015 ; 4 : 27-32.

44. Fabel K. Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. Front Neurosci 2009.

45. van Praag H, Christie BR, Sejnowski TJ, Gage FH. Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. Proc Natl Acad Sci 1999 ; 96 : 13427-31.

46. Stojan R, Voelcker-Rehage C. A Systematic Review on the Cognitive Benefits and Neurophysiological Correlates of Exergaming in Healthy Older Adults. J Clin Med 2019 ; 8 : 734.

47. Bherer L, Gagnon C, Langeard A, et al. Synergistic Effects of Cognitive Training and Physical Exercise on Dual-Task Performance in Older Adults. J Gerontol Ser B 2020 ; 76 : 1533-41.

48. Zhu X, Yin S, Lang M, He R, Li J. The more the better? A meta-analysis on effects of combined cognitive and physical intervention on cognition in healthy older adults. Ageing Res Rev 2016 ; 31 : 67-79.

49. Knaepen K, Goekint M, Heyman EM, Meeusen R. Neuroplasticity - Exercise-Induced Response of Peripheral Brain-Derived Neurotrophic Factor: A Systematic Review of Experimental Studies in Human Subjects. Sports Med 2010 ; 40 : 765-801.

50. Gheysen F, Poppe L, DeSmet A, et al. Physical activity to improve cognition in older adults: can physical activity programs enriched with cognitive challenges enhance the effects? A systematic review and meta-analysis. Int J Behav Nutr Phys Act 2018 ; 15 : 63.

51. Wollesen B, Wildbredt A, van Schooten KS, Lim ML, Delbaere K. The effects of cognitive-motor training interventions on executive functions in older people: a systematic review and meta-analysis. Eur Rev Aging Phys Act 2020 ; 17 : 9.

52. Guo W, Zang M, Klich S, Kawczyński A, Smoter M, Wang B. Effect of Combined Physical and Cognitive Interventions on Executive Functions in Older Adults: A Meta-Analysis of Outcomes. Int J Environ Res Public Health 2020 ; 17 : 6166.

53. Lauenroth A, Ioannidis AE, Teichmann B. Influence of combined physical and cognitive training on cognition: a systematic review. BMC Geriatr 2016 ; 16 : 141.

54. Green CS, Bavelier D. Exercising your brain: A review of human brain plasticity and training-induced learning. Psychol Aging 2008 ; 23 : 692-701.

55. Maillot P, Perrot A, Hartley A. Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. Psychol Aging 2012 ; 27 : 589-600.

56. Anderson-Hanley C, Maloney M, Barcelos N, Striegnitz K, Kramer A. Neuropsychological Benefits of Neuro-Exergaming for Older Adults: A Pilot Study of an Interactive Physical and Cognitive Exercise System (iPACES). J Aging Phys Act 2017 ; 25 : 73-83.

57. Gallou-Guyot M, Mandigout S, Bherer L, Perrochon A. Effects of exergames and cognitive-motor dual-task training on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults: An overview. Ageing Res Rev 2020 ; 63 : 101135.

58. Adcock M, Fankhauser M, Post J, et al. Effects of an In-home Multicomponent Exergame Training on Physical Functions, Cognition, and Brain Volume of Older Adults: A Randomized Controlled Trial. Front Med 2020 ; 6 : 321.

59. Monteiro-Junior R, Vaghetti CO, Nascimento OJ, Laks J, Deslandes A. Exergames: neuroplastic hypothesis about cognitive improvement and biological effects on physical function of institutionalized older persons. Neural Regen Res 2016 ; 11 : 201.

60. Bherer L, Kramer AF, Peterson MS, Colcombe S, Erickson K, Becic E. Training effects on dual-task performance: Are there age-related differences in plasticity of attentional control? Psychol Aging 2005 ; 20 : 695-709.

61. Basak C, Boot WR, Voss MW, Kramer AF. Can training in a real-time strategy video game attenuate cognitive decline in older adults? Psychol Aging 2008 ; 23 : 765-77.

62. Jiang J, Guo W, Wang B. Effects of exergaming on executive function of older adults: a systematic review and meta-analysis 2022.

63. Soares VN, Yoshida HM, Magna TS, Sampaio RAC, Fernandes PT. Comparison of exergames versus conventional exercises on the cognitive skills of older adults: a systematic review with meta-analysis. Arch Gerontol Geriatr 2021 ; 97 : 104485.

64. Fang Q, Ghanouni P, Anderson SE, et al. Effects of Exergaming on Balance of Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. Games Health J 2020 ; 9 : 11-23.

65. Janhunen M, Karner V, Katajapuu N, et al. Effectiveness of Exergame Intervention on Walking in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials 2021 ; 101 : pzab152.

66. Pacheco TBF, Medeiros CSP de, Oliveira VHB de, Vieira ER, Cavalcanti FAC de. Effectiveness of exergames for improving mobility and balance in older adults: a systematic review and meta-analysis. Syst Rev 2020 ; 9 : 163.

67. Graves LEF, Ridgers ND, Williams K, Stratton G, Atkinson G, Cable NT. The Physiological Cost and Enjoyment of Wii Fit in Adolescents, Young Adults, and Older Adults. J Phys Act Health 2010 ; 7 : 393-401.

68. Lyons EJ, Tate DF, Ward DS, Ribisl KM, Bowling JM, Kalyanaraman S. Engagement, enjoyment, and energy expenditure during active video game play. Health Psychol 2014 ; 33 : 174-81.

69. Valenzuela T, Okubo Y, Woodbury A, Lord SR, Delbaere K. Adherence to Technology-Based Exercise Programs in Older Adults: A Systematic Review. J Geriatr Phys Ther 2018 ; 41 : 49-61.

70. Kayama H, Okamoto K, Nishiguchi S, Yamada M, Kuroda T, Aoyama T. Effect of a Kinect-Based Exercise Game on Improving Executive Cognitive Performance in Community-Dwelling Elderly: Case Control Study. J Med Internet Res 2014 ; 16 : e61.

71. Htut TZC, Hiengkaew V, Jalayondeja C, Vongsirinavarat M. Effects of physical, virtual reality-based, and brain exercise on physical, cognition, and preference in older persons: a randomized controlled trial. Eur Rev Aging Phys Act 2018 ; 15 : 10.

72. Peng H-T, Tien C-W, Lin P-S, Peng H-Y, Song C-Y. Novel Mat Exergaming to Improve the Physical Performance, Cognitive Function, and Dual-Task Walking and Decrease the Fall Risk of Community-Dwelling Older Adults. Front Psychol 2020 ; 11 : 1620.

73. Ogawa EF, You T, Leveille SG. Potential Benefits of Exergaming for Cognition and Dual-Task Function in Older Adults: A Systematic Review. J Aging Phys Act 2016 ; 24 : 332-6.

74. Sala G, Semir K, Gobet F. Still No Evidence That Exergames Improve Cognitive Ability: A Commentary on Stanmore et al. (2017). Neurosci Biobehav Rev 2021 ; 123 : 352-3.

75. Temprado J-J. Can Exergames Be Improved to Better Enhance Behavioral Adaptability in Older Adults? An Ecological Dynamics Perspective. Front Aging Neurosci 2021 ; 13 : 670166.

76. Peng W, Lin J-H, Crouse J. Is Playing Exergames Really Exercising? A Meta-Analysis of Energy Expenditure in Active Video Games. Cyberpsychology Behav Soc Netw 2011 ; 14 : 681-8.

77. Larsen LH, Schou L, Lund HH, Langberg H. The Physical Effect of Exergames in Healthy Elderly—A Systematic Review. Games Health J 2013 ; 2 : 205-12.

78. Martin-Niedecken AL, Mekler ED. The ExerCube: Participatory Design of an Immersive Fitness Game Environment. In : Göbel S, Garcia-Agundez A, Tregel T, Ma M, Baalsrud Hauge J, Oliveira M, et al., eds. Joint International Conference on Serious Games. Cham : Springer, 2018 : 263-75.

79. Taylor LM, Kerse N, Frakking T, Maddison R. Active Video Games for Improving Physical Performance Measures in Older People: A Meta-analysis. J Geriatr Phys Ther 2018 ; 41 : 108-23.

80. Barnes JN. Exercise, cognitive function, and aging. Advances in Physiology Education 2015 ; 6 : 89-106.

81. Johnson D, Deterding S, Kuhn K-A, Staneva A, Stoyanov S, Hides L. Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature. Internet Interv 2016 ; 6 : 89-106.

82. Perrot A, Maillot P. Factors for optimizing intervention programs for cognition in older adults: the value of exergames. Npj Aging 2023 ; 9 : 4.

83. Roure C, Fargier P, Girod G, Cécé V, Pasco D, Lentillon-Kaestner V. Exergaming in a Multiplayer and Inter-Team Competition Mode with Play Lü: Effects on Adolescents' Moderate-to-Vigorous Physical Activity and Situational Interest. Int J Phys Act Health 2022 ; 1 : 3.

84. Roure C, Lentillon-Kaestner V, Fargier P. Effets d'un affrontement inter-équipes avec le dispositif interactif Play Lü sur l'intérêt en situation et l'activité physique des adolescents 2021.

85. Martin-Niedecken AL, Rogers K, Turmo Vidal L, Mekler ED, Márquez Segura E. ExerCube vs. Personal Trainer: Evaluating a Holistic, Immersive, and Adaptive Fitness Game Setup. Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Glasgow Scotland UK : ACM, 2019 : 1-15.

86. Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults. Games Health J 2022 ; g4h.2022.0075.

87. Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. The effects of a new immersive multi-domain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults. GeroScience 2024 ; 46 : 1825-41.

88. Wechsler D. WMS-III: Wechsler memory scale administration and scoring manual. San Antonio : The Psychological Corporation, 1997.

89. Finkelstein S, Suma EA. Astrojumper: Motivating Exercise with an Immersive Virtual Reality Exergame. Presence Teleoperators Virtual Environ 2011 ; 20 : 78-92.

90. Murray EG, Neumann DL, Moffitt RL, Thomas PR. The effects of the presence of others during a rowing exercise in a virtual reality environment. Psychol Sport Exerc 2016 ; 22 : 328-36.

91. Kober SE, Kurzmann J, Neuper C. Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG study. Int J Psychophysiol 2012 ; 83 : 365-74.

92. Huang K-T. Exergaming Executive Functions: An Immersive Virtual Reality-Based Cognitive Training for Adults Aged 50 and Older. Cyberpsychology Behav Soc Netw 2020 ; 23 : 143-9.

93. Swain DP, ACSM, Brawner CA. ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

94. Diamond A, Ling DS. Review of the Evidence on, and Fundamental Questions About, Efforts to Improve Executive Functions, Including Working Memory. In : Cognitive and Working Memory Training. Oxford University Press, 2019 : 143-431.

95. Martin-Niedecken AL, Schwarz T, Schättin A. Comparing the Impact of Heart Rate-Based In-Game Adaptations in an Exergame-Based Functional High-Intensity Interval Training on Training Intensity and Experience in Healthy Young Adults. Front Psychol 2021 ; 12.

96. Da Silva Júnior JLA, Biduski D, Bellei EA, et al. A Bowling Exergame to Improve Functional Capacity in Older Adults: Co-Design, Development, and Testing to Compare the Progress of Playing Alone Versus Playing With Peers. JMIR Serious Games 2021 ; 9 : e23423.

97. Gomes M, Figueiredo D, Teixeira L, Poveda V, Paúl C, Santos-Silva A, et al. Physical inactivity among older adults across Europe based on the SHARE database. Age Ageing 2017 ; 46 : 71-7.

98. Pedersen MRL, Hansen AF, Elmose-Østerlund K. Motives and Barriers Related to Physical Activity and Sport across Social Backgrounds: Implications for Health Promotion. Int J Environ Res Public Health 2021 ; 18 : 5810.

99. Trost SG, Owen N, Bauman AE, Sallis JF, Brown W. Correlates of adults' participation in physical activity: review and update. Med Sci Sports Exerc 2002 ; 34 : 1996-2001.

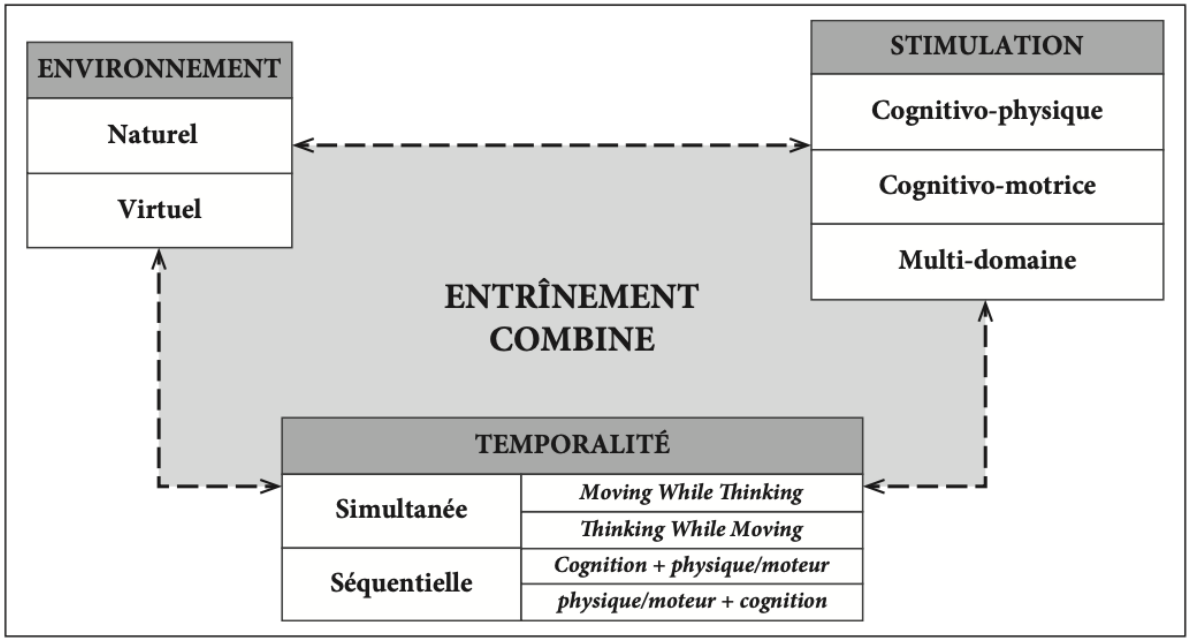


Figure 1. Les différentes caractéristiques potentielles de l'entraînement combiné.
Figure 1. The various potential characteristics of combined training.

Notes. Les entraînements combinés possèdent des caractéristiques différentielles pouvant être décomposées en trois modalités : a) la temporalité (i.e., simultanée, séquentielle) ; b) la stimulation (i.e., cognitivo-motrice, cognitivo-physique, multi-domaine) ; et c) l'environnement (i.e., naturel, virtuel). L'interaction « *Moving While Thinking* » [3] signifie que la stimulation cognitive est intégrée à la sollicitation motrice/physique. L'interaction « *Thinking While Moving* » désigne que la stimulation cognitive et motrice/physique ne sont pas liées.

Figure 2. Photographies d'une séance d'exergames assistés par un mur immersif et interactif
Figure 2. Pictures of a session of exergames assisted by an immersive and interactive wall.

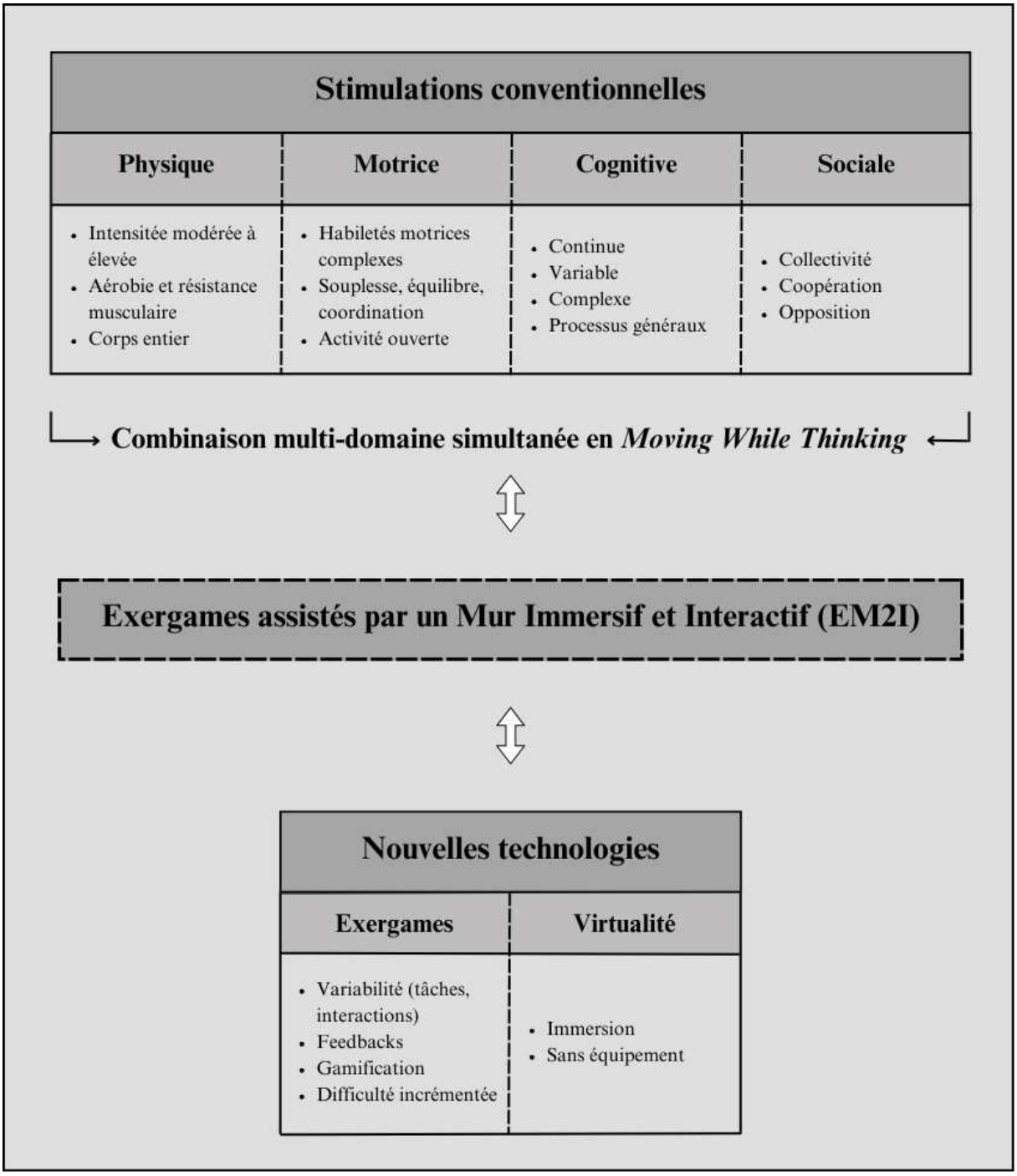


Figure 3. Description des modalités des EM2I

Figure 3. Description of the modalities of EM2I.

Notes. Les exergames assistés par un mur immersif et interactif (EM2I) héritent des modalités de certaines stimulations conventionnelles (i.e., physique, motrice, cognitive, sociale) et de nouvelles technologies (i.e., exergames, virtualité).

Annexe 2. Article publié dans Neurologie Psychiatrie Gériatrie

Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot. Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées. NPG: Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie, 2022, 22 (129), pp.149-157. 10.1016/j.npg.2021.08.002 . hal-04426138

HAL Id: hal-04426138
https://hal.science/hal-04426138v1

Submitted on 18 Feb 2024

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

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

Version of Record: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S162748302100129X
Manuscript_f2f9096478b85918ccae9aa0ca44da12

Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées

The impact of a cooperation and opposition physical activity program on cognitive function among older adults

Auteurs

Néva Béraud-Peigné, UFR STAPS, Université de Paris, 75015

Pauline Maillot, Université de Paris, I3SP, 75015 Paris, France

Alexandra Perrot, Université Paris Saclay, CIAMS, 91405, Orsay, France – Université d'Orléans, CIAMS, 45067, Orléans, France

Correspondance concernant l'article :

Néva Béraud-Peigné, nevabp1@live.fr

Sources de financement

Les auteurs déclarent ne pas avoir de sources de financement

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts

© 2021 published by Elsevier. This manuscript is made available under the Elsevier user license
https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/

Résumé

Objectifs. L'objectif de cette étude était d'évaluer si l'activité physique de coopération avec un ou plusieurs partenaires et d'opposition avec un ou plusieurs adversaires peut générer des bénéfices cognitifs chez les personnes âgées.

Patients et méthode. La méthode pré-test – entraînement (3 mois) – post-test a été utilisée, comparant un groupe intervention à un groupe contrôle passif. Les sujets ont réalisé une batterie de tests évaluant leurs fonctions cognitives et leurs capacités fonctionnelles afin d'évaluer l'impact cognitif et physique du programme.

Résultats. Les scores de progrès (résultats post-test – pré-test) ont été calculés pour les deux groupes. Une amélioration de la planification (M = 3,7, ET = 3,2) et de la mémoire visuospatiale à court terme (M = 1,5, ET = 1,8) a été constatée pour le groupe intervention. Il n'y a pas eu de modification de la mémoire de travail visuospatiale, de l'inhibition et de la flexibilité mentale. L'équilibre dynamique est conservé pour le groupe intervention (M = -0,4, ET = 1,2), alors qu'il est détérioré chez les sujets du groupe contrôle (M = 1,1, ET = 0,4).

Discussion. Le travail cognitif et l'environnement riche émanant de la coopération et de l'opposition peuvent être à l'origine de l'amélioration des fonctions cognitives.

Conclusion. Ces résultats laissent présager que la coopération et l'opposition pourraient être des leviers intéressants à inclure dans un programme de stimulations afin d'améliorer certaines fonctions cognitives chez les personnes âgées. Seules de futures expérimentations permettront de le confirmer.

Mots-clés : coopération ; opposition ; fonctions cognitives ; activité physique ; personne âgée

Abstract

Objectives. The purpose of this study was to determine whether physical activity involving cooperation with one or more partners and opposition with one or more opponents could have cognitive benefits for older adults.

Patients and methods. The authors used a pre-test – training (3 months) – post-test design comparing an experimental group to a passive control group. The participants completed a battery of executive function and functional fitness tests to measure the cognitive and physical impact of this program.

Results. The subjects in the experimental group improved in planning (M = 3.7, ET = 3.2) and short-term visuospatial memory (M = 1.5, ET = 1.8). There were no changes in visuospatial working memory, inhibition or mental flexibility. The dynamic balance was maintained for the subjects in the experimental group (M = -0.4, ET = 1.2) while it deteriorated for the subjects in the control group (M = 1.1, ET = 0.4).

Discussion. The cognitive activity and the rich environment provided by cooperation and opposition could be responsible for the improvement in cognitive functions.

Conclusion. These mixed results suggest that cooperation and opposition could be interesting levers to

include in a stimulation program to improve certain cognitive functions among the elderly. Only future experiments will allow us to confirm this.

Keywords: cooperation; opposition; cognitive function; physical activity; elderly

Le vieillissement de la population place le maintien de l'autonomie et la qualité de vie des personnes âgées comme un enjeu majeur de santé publique. L'avancée en âge réussie est singulièrement conditionnée par la vitalité cognitive, « ce qui compte c'est combien d'années vous avez avant de perdre la tête, non combien d'années vous avez en restant debout » comme le souligne métaphoriquement l'auteur et journaliste Michael Kinsley [1]. Pourtant, dans le cadre du vieillissement normal, c'est-à-dire sans pathologie, une grande partie des plus de 65 ans ont au moins une fonction cognitive qui décline [2]. Le vieillissement cognitif est particulièrement prononcé sur les fonctions exécutives [3] ayant pour rôle l'adaptation à des situations non routinières et donc la mise en place de nouvelles stratégies. Quatre d'entre elles semblent particulièrement touchées par l'avancée en âge : i) l'inhibition, caractérisée par la capacité à s'empêcher de produire une réponse automatique, à arrêter la production d'une réponse en cours et à écarter les stimulations non pertinentes pour l'action en cours, ii) la mémoire de travail se rapportant aux habiletés permettant le maintien et la manipulation cognitive de l'information à court terme, iii) la flexibilité attentionnelle donnant la capacité de passer d'un comportement à un autre, en déplaçant rapidement l'attention, iv) la planification, faculté à organiser une série d'actions en une séquence optimale visant à un but.

Le déclin cognitif ne peut pas être considéré comme un élément inévitable du vieillissement. Certaines personnes âgées maintiennent un niveau d'efficacité cognitive élevé [4], ce qui reflète l'existence d'une variabilité inter-individuelle. Ces différences sont associées à la présence d'une réserve cognitive, donnant la capacité à l'individu d'utiliser plusieurs stratégies cognitives afin d'optimiser sa performance, en faisant appel à des réseaux neuronaux alternatifs pour atteindre le but de la tâche [5]. La plasticité cérébrale, caractérisée comme la capacité du cerveau à modifier l'organisation de ses réseaux de neurones en fonction des expériences [6], joue un rôle fondamental dans ce processus. Elle est en lien direct avec l'hypothèse de l'enrichissement cognitif, stipulant que tous les comportements adoptés par un individu au cours de sa vie ont un impact significatif sur son fonctionnement cognitif et ce, même à un âge avancé [7]. Le niveau de performance cognitive est malléable et sujet à évolution tout au long de la vie. Les individus ont donc un potentiel d'amélioration (ou de déclin), qui apparaît sous l'influence de différents facteurs, appelés modérateurs. Les principaux sont liés au mode de vie des individus tels que le nombre d'années de scolarité, l'alimentation, l'expertise professionnelle, l'entraînement cognitif, le sommeil et l'activité physique [8].

Les effets modulateurs de l'activité physique sur les fonctions cognitives sont particulièrement étudiés [8-19]. Classiquement, les études interventionnelles s'orientent vers des programmes d'activité physique individuelle (marche, vélo, yoga) [14-19], se désintéressant d'autres types de pratiques physiques (sports collectifs, sports de combat). Cependant, Audiffren et al suggèrent en 2011 [9], qu'il serait intéressant d'étudier les effets de l'activité physique de coopération et d'opposition sur les

fonctions cognitives. En effet, plusieurs études sur les sportifs de haut de niveau dans ce type d'activité révèlent la présence d'un lien entre le niveau sportif et cognitif et supposent que l'entraînement à ce type d'activité physique peut permettre l'augmentation des fonctions exécutives [20,21]. Ainsi, la coopération et l'opposition dans l'activité physique apparaissent être des leviers intéressants afin de développer les fonctions cognitives des personnes âgées. La coopération peut être définie comme la réalisation conjointe, avec au moins un autre individu, d'une ou plusieurs actions communes dans le but d'atteindre un objectif défini au préalable [22]. L'opposition se caractérise par l'affrontement d'au moins deux adversaires pour atteindre le même but.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de l'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions suivantes : fonctions exécutives (planification, mémoire de travail visuospatiale, inhibition, flexibilité mentale), mémoire visuospatiale à court terme et capacités fonctionnelles chez des sujets âgés sans troubles cognitifs majeurs.

Patients et méthodes

Les sujets

L'étude est réalisée auprès de personnes âgées vivant en Ile-de-France, adhérant à l'association Viacti. Ils ont été contactés par mail ou par téléphone afin de les inviter à participer à l'étude. Les critères d'inclusion étaient les suivants : (a) être âgé de 65 à 80 ans, (b) avoir un score au *Mini-Mental State Examination* (MMSE) [23] supérieur à 26, (c) au *Geriatric Depression Scale* 30 (GDS 30) [24] inférieur ou égal à 9 et à une échelle de santé subjective (1= très mauvaise, 2 = mauvaise, 3 = normale, 4 = bonne, 5 = très bonne) supérieur ou égal à 3, (d) ne pas avoir de pathologie déclarée, (e) être droitier, (f) avoir une vision et une audition correcte ou corrigée, (g) parler le français comme langue maternelle, (h) vivre de manière indépendante, (i) être retraité et (j) ne pas ou peu exercer d'activité physique.

Protocole

L'étude s'est déroulée sur 14 semaines : pré-tests (la première semaine), 12 semaines de programme, post-tests (la quatorzième semaine). Le programme était composé de 2 séances d'une heure par semaine, soit 24 au total. Les séances commençaient par un échauffement de 10 minutes. Il était suivi d'un corps de séance de 40 minutes constitué d'exercices de coopération et d'opposition issus de sports collectifs (le basket-ball, le volley-ball, le rugby) et individuels (la boxe, la musculation). Une première partie était axée sur de l'endurance et une seconde sur du renforcement musculaire. Du matériel varié a été utilisé (balles de tennis, de basket-ball, de volley, de rugby, de baudruche, élastiques, chaises, plots). Le nombre de partenaires et/ou d'adversaires changeait régulièrement. L'intensité de pratique a été contrôlée à partir de l'échelle de Borg modifiée [25]. Il était demandé aux participants d'atteindre au minimum 3/10 sur cette échelle afin d'engendrer une

intensité de pratique au moins modérée. Enfin, les séances se terminaient par des étirements et de la relaxation pendant 10 minutes. Un enseignant en activité physique adaptée encadrait les séances. Il avait le rôle d'expliquer et de montrer les exercices, d'assurer la sécurité des pratiquants, de calibrer la difficulté des exercices en fonction de chaque participant, de corriger et de faire des retours. Les séances étaient collectives (10 participants) et se déroulaient dans une salle fermée mise à disposition par l'association Viacti.

Les outils de mesure

Les séances de pré-tests et de post-tests durent environ une heure. Chaque test est exécuté individuellement dans un environnement calme.

La batterie de tests des fonctions cognitives

Test du Plan du zoo. Ce test est issu de la *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome* [26], une batterie de tests écologiques validée. Le Test du *Plan du Zoo* permet d'évaluer principalement la capacité de planification. La version traduite en français est utilisée [27]. Le sujet doit indiquer le parcours qu'il emprunterait pour visiter une série de lieux (6 lieux sur 12) sur un plan, en évitant de commettre des erreurs. Dans la première partie, *formulation du plan*, le sujet doit organiser lui-même ses déplacements. Dans la seconde, *exécution d'un plan*, il doit suivre les instructions données. Pour chaque condition, le *temps de planification*, le *temps total*, le *nombre d'erreurs* et le *score séquence* sur 8 points sont récoltés. Les deux *scores séquence* sont ensuite additionnés pour fournir un *score total* sur 16 points.

Test de Corsi [28]. Ce test comporte deux parties. Dans la première, permettant d'évaluer la mémoire visuospatiale à court terme, le sujet doit reproduire dans le même ordre une séquence de mouvements de pointage de différents cubes désignés par l'examinateur. Dans la seconde partie qui évalue la mémoire de travail visuospatiale, le sujet doit reproduire en ordre inverse la séquence de mouvements. Le nombre de cubes augmente progressivement et permet de déterminer dans un premier temps, *l'empan visuospatial* et dans un second, l'*empan visuospatial inverse*. Le cumul des deux scores produit *l'empan visuospatial total.*

Test de Stroop [29]. Ce test évalue la capacité d'inhibition. Ici, seulement les 3 premières planches sont conservées. Chacune contient 100 items, avec des mots de 4 couleurs (jaune, rouge, vert, bleu), répartis sur 10 colonnes. La première, celle de la *condition de dénomination*, contient des rectangles de couleur. La seconde est celle de la *condition de lecture*, des mots de couleurs sont écrits à l'encre noire. Dans la troisième, *condition d'interférence*, les mots de couleurs sont écrits avec une couleur d'encre différente de leur signification. Le *nombre de mots* donnés en 45 secondes correspond à la mesure de la performance. Le *nombre d'erreurs* est également relevé. Seuls les résultats de la troisième condition sont conservés pour l'étude.

Trail Making Test [30]. Ce test évalue principalement la flexibilité cognitive. La partie A consiste

à relier une série de chiffres croissants allant de 1 à 25 en sélectionnant le chiffre pertinent parmi les 25 items possibles. Dans la partie B du TMT, le sujet doit mener de front une série de chiffres et une de lettres en alternance. Il doit le réaliser le plus rapidement possible, sans lever le stylo. S'il fait des erreurs, l'examinateur informe le sujet qui doit les rectifier. La flexibilité est spécifiquement mise en évidence par l'analyse de la différence de résultat B – A.

La batterie de tests des capacités fonctionnelles

L'évaluation des capacités fonctionnelles est intégrée au protocole afin d'enrichir les interprétations des résultats sur les fonctions cognitives.

Senior Fitness Test. Ce protocole d'évaluation complet de la condition physique [31] permet d'apprécier et de mesurer les capacités fonctionnelles renvoyant aux gestes de la vie quotidienne. Il est composé de 6 tests permettant d'évaluer la force des membres inférieurs (*30 secondes assis debout*) et supérieurs (*flexion des bras*), la souplesse des membres inférieurs (*souplesse assis sur une chaise*), l'agilité et l'équilibre dynamique (*aller-retour en marchant*), la souplesse des membres supérieurs (*gratte-dos*) et l'endurance aérobie (*2 minutes sur place).* Il est administré après 5 minutes d'échauffement. Ici c'est la version française qui est utilisée [32].

Questionnaire de ressenti subjectif

A la fin du programme, les sujets remplissent un questionnaire anonyme qui a pour but d'évaluer leur ressenti. Il est composé de quatre questions sous forme d'échelle de 1 à 5, à propos (a) de la difficulté des séances, (b) de leur évolution physique et (c) cognitive et (d) l'envie de continuer un programme de ce type.

Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel JASP. Le seuil de significativité retenu a été de $p < 0,05$. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé afin de vérifier la normalité de la distribution des résultats. Etant donné le faible échantillon et que les données ne suivent pas la loi normale, des tests de Mann-Whitney ont été utilisés pour réaliser les analyses statistiques.

Résultats

L'étude a été réalisée auprès de 15 personnes âgées. Le groupe contrôle comportait 8 femmes et le groupe intervention 6 femmes et 1 homme. Les caractéristiques des sujets des groupes contrôle et intervention sont données dans le tableau 1.

La première étape de l'analyse a consisté à vérifier si les deux groupes ne présentaient pas de différences avant le programme. Pour l'ensemble des tests (fonctions cognitives et capacités fonctionnelles) et des variables indépendantes (âge, années de scolarité, IMC, MMSE, GDS30, échelle

de santé), aucune différence significative n'a été notée.

La seconde étape reposait sur la mesure de l'adhésion du groupe intervention au programme. Le nombre de séances réalisées par les 7 participants variait entre 20 et 23 séances (M = 21,7, ET = 1,1). L'adhésion totale était de 90,5 % (152 séances faites sur 168). Le questionnaire indiquait que la totalité des participants avaient envie de continuer un programme de ce type (57% envie forte et 43% envie très forte). Quatre-vingt-six pour cent des sujets ressentaient une évolution positive de leur condition physique et cognitive. Quarante-trois pour cent ont trouvé que l'intensité des séances était facile et 57% modérée.

La troisième étape consistait à évaluer les effets cognitifs et physiques du programme. Les scores de progrès (résultats post-test – pré-test) ont été calculés pour les deux groupes. Les statistiques descriptives et inférentielles sont données dans le tableau 2 pour les fonctions cognitives et dans le tableau 3 pour les capacités fonctionnelles. En plus du test Mann-Whitney, le d de Cohen a été utilisé afin de renseigner les tailles d'effet.

Pour le test du *Plan du Zoo*, le taux de progrès du *score total* était significativement différent entre les deux groupes (W = 8,5, $p < 0,05$, d = -0,7). Le groupe intervention augmentait son score de 3,7 points (ET = 3,2) contrairement au groupe contrôle qui le diminuait légèrement de 0,2 point (ET = 2,6). Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes pour les autres données de ce test, et ce dans les deux parties (*temps de planification*, *temps total*, *nombre d'erreurs*, *score séquence*).

Pour le *test de Corsi*, le groupe intervention améliorait son score d'*empan visuospatial* de 1,6 point (ET = 1,8), d'*empan visuospatial inverse* de 1,1 (ET = 1,1) et d'*empan visuospatial total* de 2,7 (ET = 1,5) après le programme, à l'inverse du groupe contrôle qui le diminuait, respectivement de 0,9 (ET = 0,8), 0,1 (ET = 1,4) et 1,0 (ET = 1,7) point. Ces variations étaient significativement différentes entre les deux groupes pour l'*empan visuospatial* (W = 3,0, $p < 0,01$, d = -0,9) et l'*empan visuospatial total* (W = 2,5, $p < 0,01$, d = -0,9). Pour l'*empan visuospatial inverse*, les résultats se révélaient non significatifs. Il n'y avait pas de différence de variation significative entre les deux groupes ($p > 0,05$). Cependant, il s'en rapprochait fortement (p = 0,08) avec une taille d'effet moyenne (W = 13,0, d = -0,5) et un risque d'erreur de type II élevé ($\beta = 0,9$).

Il n'y avait pas de modifications significatives de résultats entre les deux groupes au *test de Stroop* (*nombre de mots*, *nombre d'erreurs* en condition d'interférence) et au *Trail Making Test* (*temps B-A*).

Un seul test évaluant les capacités fonctionnelles a montré une évolution différente entre les deux groupes. Il s'agissait du temps de réalisation du test *aller-retour en marchant* (W = 52,0, $p < 0,01$, d = 0,9). Le groupe intervention diminuait légèrement ce temps de 0,4 seconde (ET = 1,3) alors que le groupe contrôle l'augmentait de 1,7 secondes (ET = 0,4). Les autres données récoltées (*30 secondes assis debout*, *flexion des bras*, *souplesse assis sur une chaise*, *gratte-dos*) ne montraient pas de différence significative entre les deux groupes.

Discussion

Cette étude exploratoire a montré des améliorations significatives sur deux fonctions cognitives (planification et mémoire visuospatiale à court terme) pour les sujets ayant suivis le programme de coopération et d'opposition. Les recherches à propos des bénéfices chroniques de l'activité physique montrent une relation positive entre la pratique d'une activité physique régulière et la vitalité cognitive des personnes âgées. Plusieurs travaux [10-13] confirment ces propos et précisent que les fonctions exécutives seraient les plus sensibles aux effets de l'activité physique. Ici, la seule fonction exécutive concernée est la planification, améliorée de manière très fiable au regard de la taille d'effet élevée. La mémoire visuospatiale à court terme a également été enrichie. Cette fonction cognitive offre la possibilité de maintenir en mémoire une information visuospatiale pendant un laps de temps très court et de pouvoir la restituer pendant ce délai. De plus, la mémoire de travail visuospatiale a été légèrement améliorée pour les sujets de groupe intervention, en accord avec les résultats de plusieurs études [17,19], avec une augmentation de 1,1 point de l'*empan visuospatial inverse* entre les pré- et les post-tests. Néanmoins, le traitement statistique ne permet pas de tirer des conclusions définitives ($p = 0,08$). Contrairement aux résultats de nombreuses études interventionnelles [14,17-19], il n'y a pas de modification pour les deux groupes en ce qui concerne l'inhibition et la flexibilité mentale. Elles ont pourtant été évaluées respectivement par le *test de Stroop* et le *Trail Making Test*, fréquemment utilisés dans ce domaine d'étude et sensibles aux bénéfices des programmes d'activité physique [16-19]. Enfin, les capacités fonctionnelles n'ont également pas été modifiées, cependant l'équilibre dynamique a été conservé chez les sujets du groupe intervention (alors qu'il est détérioré chez ceux du groupe contrôle). La divergence des effets de ce programme d'activité physique présume l'existence de mécanismes agissant de manière hétérogène sur les fonctions cognitives.

La coopération dans l'activité physique appelle à planifier l'action avec les partenaires, mettre en place des choix tactiques, anticiper les intentions, initier la réponse appropriée et modifier l'action si besoin. Les pratiquants doivent alors établir un plan, décider et exécuter leurs actions rapidement, ce qui fait appel aux fonctions cognitives [33]. Plus particulièrement, la capacité à inhiber les décisions planifiées et s'adapter rapidement à de nouvelles situations pourrait avoir recours à l'inhibition et à la flexibilité mentale. La mémoire de travail visuospatiale serait également sollicitée. Elle pourrait permettre l'évaluation des différentes informations d'une situation et leur manipulation cognitive pour produire une réponse [21] dans une dimension visuelle et spatiale (analyser, comprendre et se représenter l'espace). De même, la mémoire visuospatiale à court terme pourrait permettre de retenir différentes informations dans un délai réduit. La capacité de planification serait également stimulée de manière à créer une stratégie adéquate et orchestrer une action adaptée. L'opposition, elle, impose à l'individu l'utilisation de ces mêmes processus mais à des niveaux de difficulté plus intenses étant donné la présence d'adversaires qui nécessitent un traitement cognitif plus complexe. Ainsi, le travail cognitif spécifique produit par la coopération et l'opposition pourrait être à l'origine de l'amélioration

de certaines fonctions cognitives, de la même manière que les exercices plus standards d'entraînement cognitif procurent des bénéfices cognitifs [7]. Dès lors, il apparaît que la planification et la mémoire visuospatiale à court terme ont pu être plus grandement sollicitées que les autres fonctions cognitives. Effectivement, pendant les exercices du programme, les sujets devaient en permanence élaborer des tactiques judicieuses (par exemple, donner la balle à un coéquipier et non à un autre) afin de réaliser l'objectif (par exemple, amener la balle d'un point A à un point B), faisant appel à la planification. Ils devaient également retenir des déplacements, sollicitant abondamment la mémoire visuospatiale à court terme.

Des théories explicatives de l'enrichissement cognitif par l'activité physique sont apparues ces dernières années [9,34] afin de tenter d'éclaircir les mécanismes mis en jeu. Deux principales hypothèses pourraient permettre d'expliquer les potentiels bénéfices cognitifs d'un programme d'activité physique basé sur des situations de coopération et d'opposition. La première repose sur l'aspect enrichissant de ce type d'activité. Les apprentissages seraient produits grâce à la diversité dans les tâches d'apprentissage et dans les types d'interactions proposées [35]. Cela présume qu'il y a une corrélation positive entre la variété de combinaisons de processus impliqués dans un programme d'entraînement et l'importance des effets de transfert [36]. Effectivement, par ses propriétés intrinsèques, la coopération et l'opposition offrent une grande variabilité qui peut être bénéfique. L'interaction avec les partenaires et/ou les opposants engendre des quantités élevées d'éléments instables et imprévisibles. Chaque situation est différente, en fonction de sa propre action et de celle des autres. La variété des activités, des interactions et l'adaptation de la difficulté de la tâche réalisée par l'enseignant en activité physique adaptée sont des facteurs additifs suscitant la richesse de la coopération et de l'opposition. Elles permettent alors de confronter les sujets à de nouvelles tâches sensorimotrices, ce qui serait propice à la synaptogénèse. Effectivement, l'hypothèse de l'augmentation de la plasticité synaptique présume que l'activité physique, grâce à la richesse apportée, permettrait la création de nouvelles connexions et/ou renforcerait l'efficacité de la transmission synaptique [9,37]. L'hypothèse métabolique est la seconde pouvant expliquer les bénéfices cognitifs de ce type de programme. Elle postule que l'activité physique, notamment lorsqu'elle est de nature aérobie, engendrerait une augmentation du flux sanguin dans les aires frontales, permettant une meilleure oxygénation du système nerveux central [14]. L'effet de l'aptitude aérobie serait particulier et produirait une « amélioration sélective » [13] des fonctions cognitives dépendantes de ces régions cérébrales (les fonctions exécutives). L'amélioration des performances physiques (ici l'aptitude aérobie) serait liée à celle des fonctions cognitives. Dès lors, une durée ou une intensité trop faible d'activité physique pourrait compromettre cette relation pour certaines fonctions exécutives. Il est alors possible de remettre en cause les propriétés du programme de l'étude, telles que sa durée et son intensité. Il a été construit en suivant les recommandations de la méta-analyse de Colcombe et Kramer [10] sur les propriétés des programmes entraînant les bénéfices cognitifs les plus fiables (corps de séance de 31 à 45 minutes, activité physique combinée). Toutefois, la longueur

conseillée par Colcombe et Kramer [10] est de 6 mois, ce qui n'est pas le cas de ce programme. Il est possible qu'il ait été de trop courte durée et que les potentiels effets de l'activité physique n'aient pas eu le temps d'être instaurés. Effectivement, même si plusieurs études montrent des bénéfices à partir de 3 mois, cela concerne des programmes aérobies et non combinés [16]. L'intensité du programme peut également être un des facteurs de la fixité de certaines fonctions exécutives (inhibition, flexibilité mentale, mémoire de travail visuospatiale) [7] et des capacités fonctionnelles. La difficulté des séances a été perçue comme « facile » par 43% des sujets ayant participé au programme. Étant évaluée subjectivement par les sujets grâce à l'échelle de Borg modifiée, elle n'a probablement pas été assez élevée. L'utilisation d'outils (cardio-fréquence-mètres) afin de contrôler l'intensité d'effort pendant les séances aurait été plus pertinente.

Cette étude exploratoire a permis de tester le potentiel d'un programme d'activité physique novateur afin d'émettre des pistes de recherche qui doivent faire l'objet d'une étude approfondie. La coopération et l'opposition pourraient substituer les entraînements cognitifs classiques. Effectivement, une de leurs limites étant la spécificité des effets des processus entraînés, la coopération et l'opposition pourraient permettre de travailler plusieurs processus simultanément (planification, mémoire, capacités visuospatiales) et ainsi produire des effets généralisés à d'autres tâches ou comportements. De plus, l'adhésion élevée (90,5%), l'absence d'abandon et l'envie forte (57%) à très forte (43%) des sujets de continuer ce type de programme lui confère un certain avantage. L'abandon dans un programme excède généralement 50% [38]. Le caractère collectif de la coopération et de l'opposition est propice à l'adhésion à l'activité grâce à l'influence d'autrui [39]. Les caractéristiques intrinsèques citées précédemment sont également potentiellement bénéfiques à son attrait. Ainsi, l'attractivité inhérente des activités de coopération et d'opposition pourraient permettre de lever certains freins à la pratique et lutter contre l'inactivité physique des personnes âgées. Les structures et les professionnels proposant de l'activité physique aux personnes âgées doivent repenser ces activités et les rendre plus attrayantes, notamment par l'utilisation de ce type d'activité. Il aurait été intéressant de suivre les sujets de cette étude a posteriori, afin d'évaluer leur fidélité à l'activité dans les mois et les années suivantes et de déterminer la prégnance des bienfaits cognitifs.

Cette étude s'expose à plusieurs limites, notamment du fait de l'absence de résultats empiriques dans ce domaine. Effectivement, elle explore un axe absent, à notre connaissance, de la littérature. De nombreux travaux ont étudié l'impact de différents programmes d'activité physique sur les fonctions cognitives en utilisant principalement des activités physiques individuelles [14-19]. Cependant, aucun ne s'est penché sur les activités de coopération et d'opposition, biaisant les précédentes comparaisons avec la littérature existante. Les autres limites de cette étude concernent le fait qu'elle ne soit pas randomisée et surtout qu'elle présente un effectif trop faible pour pouvoir engendrer des interprétations tranchées. La taille de l'échantillon sous-estime potentiellement les résultats cognitifs constatés, notamment au niveau de la mémoire de travail visuospatiale.

De nouveaux travaux doivent être effectués en prenant en compte les différents aspects émanant de

ce travail. Afin de confirmer l'hypothèse des bienfaits spécifiques de la coopération/opposition sur la santé cognitive et physique des personnes âgées, il s'avère indispensable de réaliser une nouvelle étude avec l'inclusion d'un groupe contrôle actif, réalisant un programme d'activité physique plus standard (marche, vélo stationnaire). Cela permettrait de connaître la part de la sollicitation physique issue de l'activité physique et de la stimulation cognitive résultant des exercices de coopération et d'opposition dans l'amélioration cognitive. De plus, bien que les sujets des deux groupes ne présentaient aucune différence significative avant le programme, que ce soit au niveau physique ou cognitif et que des critères d'inclusion stricts ont permis d'obtenir un échantillon homogène et représentatif de la population étudiée, il conviendrait de poursuivre cette étude exploratoire avec un échantillon plus conséquent, répartie de façon aléatoire dans les différents groupes de participants. Cet effectif réduit est également problématique dans l'interprétation de la significativité clinique des résultats. Effectivement, ce type d'activité pourrait s'appliquer au milieu de la réadaptation et de la rééducation (par exemple SSR, hôpitaux) ainsi qu'aux établissements d'accueil (par exemple EHPAD, EHPA, résidences) des personnes âgées. Cette étude suggère d'encourager la mise en place d'activités physiques, notamment de coopération et d'opposition. Néanmoins, seules de futures études de plus grande ampleur permettront de témoigner des bénéfices cliniques d'un programme de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives des personnes âgées. En ce qui concerne les tests, il serait préférable d'utiliser une batterie plus conséquente de tests cognitifs, à l'aide de plusieurs tâches pour chaque aspect de la cognition afin de déterminer la part de variance des variables. Effectivement, la mesure extraite d'un test unique n'est pas une pure représentation de la fonction cognitive. Cette étude suggère également d'inclure des tests écologiques. L'utilisation de ce type d'outil a pour ambition de réduire le manque de sensibilité des épreuves traditionnelles par l'utilisation de tâches plus proches de la vie quotidienne. Ils sont prometteurs puisque le test du Plan du Zoo fait partie des deux tests de cette étude à avoir été sensibles aux effets du programme.

Conclusion

De multiples études ont montré les bienfaits de l'activité physique sur un ensemble de fonctions cognitives [8-19]. Cependant, ici seules la planification et la mémoire visuospatiale à court terme ont été améliorées. Les hypothèses abordées essayent d'éclaircir les mécanismes soutenant l'évolution différentielle de certaines fonctions cognitives. Il est nécessaire que les modalités (type, intensité, durée) des programmes soient mieux définies et que l'ensemble des activités soient testées. La majorité des études interventionnelles exclue toute une catégorie d'activité physique (coopération et opposition) proposant uniquement des pratiques individuelles. De potentiels effets restent, en conséquence, inconnus. L'amélioration cognitive hypothétiquement provoquée par (a) la stimulation cognitive directe des exercices, (b) la sollicitation physique et (c) les caractéristiques intrinsèques, apporte toute la particularité de la coopération et de l'opposition. De futures études devraient

s'intéresser à cette singularité de l'activité physique qui a montré de premiers résultats encourageants. De plus, ce type d'activité semble fécond pour promouvoir la pratique d'activité physique chez les personnes âgées avec pour finalité l'augmentation de la qualité de vie. L'aspect social, ludique et attractif pourrait permettre de lever certains freins à la pratique et ainsi engager les personnes âgées à adopter un style de vie plus actif.

Remerciements

Les auteurs remercient l'association Viacti qui a rendu possible cette étude en mettant à disposition ses locaux.

Références

[1] Kinsley M. Old age: a beginner's guide. New York: Tim Duggan Books ;2016.

[2] Lemaire P, Bherer L. Vieillissement et psychométrie. In : Lemaire P, Bherer, L. Psychologie du vieillissement : une perspective cognitive. Bruxelles : De Boeck Supérieur ;2005 :60.

[3] Marquié JC, Isingrini M. Aspects cognitifs du vieillissement normal. In : Aubert E, Albaret JM. Vieillissement et psychomotricité. Marseille : De Boeck Superieur ;2001 :77-113.

[4] Ylikoski R, Ylikoski A, Keskivaara P, et al. Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risks for cognitive decline. Eur J Neurol 1999;6(6):645-52.

[5] Stern Y. Cognitive reserve. Neuropsychologia 2009;47(10):2015-28.

[6] Chen FT, Etnier JL, Chan KH, et al. Effects of exercise training interventions on executive function in older adults: a systematic review and meta-analysis. Sports Med 2020;50(8):1451-67.

[7] Hertzog C, Kramer AF, Wilson RS, et al. Enrichment effects on adult cognitive development: can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced? Psychol Sci Public Interest 2008;9(1):1-65.

[8] Engeroff T, Ingmann T, Banzer W. 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 med 2018;48(6):1405-36.

[9] Audiffren M, André N, Albinet C. Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors : bilan et perspectives. Rev Neuropsychol 2011;3(4):207-25.

[10] Colcombe S, Kramer AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. Psychol Sci 2003;14(2):125-30.

[11] Etnier JL, Nowell PM, Landers D, et al. A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. Brain Res Rev 2006;52(1):119-30.

[12] Smith PJ, Blumenthal JA, Hoffman B, et al. Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. Psychosom Med 2010;72(3):239.

[13] Kempermann G. Environmental enrichment, new neurons and the neurobiology of individuality. Nat Rev Neurosci 2019;20(4):235-45.

[14] Kramer AF, Hahn S, Cohen N, et al. Ageing, fitness and neurocognitive function. Nature 1999;400(6743):418-9.

[15] Erickson KI, Voss MW, Prakash RS, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. Proc Natl Acad Sci 2011;108(7):3017-22.

[16] Albinet CT, Boucard G, Bouquet C, et al. Increased heart rate variability and executive performance after aerobic training in the elderly. Eur J Appl Physiol 2010;109(4):617-24.

[17] Audiffren MF, Abou-Dest A, Bouquet C, et al. Effects of two programs of physical activity on psychological functions in aging people. Med Sci Sports Exerc 2010;42(5):72-3.

[18] Smiley-Oyen AL, Lowry KA, Francois SJ, et al. Exercise, fitness, and neurocognitive function in older adults: the "selective improvement" and "cardiovascular fitness" hypotheses. Ann Behav Med 2008;36(3):280-91.

[19] Dustman RE, Ruhling RO, Russell EM, et al. Aerobic exercise training and improved neuropsychological function of older individuals. Neurobiol aging 1984;5(1):35-42.

[20] Elferink-Gemser MT, Faber IR, Visscher C, et al. Higher-level cognitive functions in Dutch elite and sub-elite table tennis players. PloS One 2018;13(11):e0206151.

[21] Vestberg T, Gustafson R, Maurex L, et al. Executive functions predict the success of top-soccer players. PloS One 2012;7(4):e34731.

[22] Provost P. L'activité physique coopérative. Rev Sci Edu 1981;7(2):279-85.

[23] Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. "Mini-mental state": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. J Psychiatr Res 1975;12(3):189-98.

[24] Yesavage JA, Brink TL, Rose TL, et al. Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. J Psychiatr Res 1982;17(1):37-49.

[25] Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. Med Sci Sports Exerc 1982;14(5):377-81.

[26] Wilson BA, Evans JJ, Emslie H, et al. The development of an ecologically valid test for assessing patients with a dysexecutive syndrome. Neuropsychol Rehabil 1998;8(3):213-28.

[27] Allain P, Chaudet H, Nicoleau S, et al. Étude de la planification de l'action au moyen du test du plan du zoo dans la maladie d'Alzheimer. Rev Neurol 2007;163(2):222-30.

[28] Milner B. Interhemispheric differences in the localization of psychological processes in man. Br Med Bull 1971;27(3):272-7.

[29] Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. J Exp Psychol 1935;18(6):643.

[30] Reitan RM. Manual for administration of neuropsychological test batteries for adults and children. Tucson : Neuropsychology Laboratory; 1979.

[31] Rikli RE, Jones CJ. Senior fitness test manual. Champaign : Human Kinetics ;2013.

[32] Fournier J, Vuillemin A, Le Cren F. Mesure de la condition physique chez les personnes âgées. Évaluation de la condition physique des seniors : adaptation française de la batterie américaine «Senior Fitness Test». Sci Sport 2012;27(4):254-9.

[33] Walsh V. Is sport the brain's biggest challenge? Curr biol 2014;24(18):859-60.

[34] Greenwood PM, Parasuraman R. Neuronal and cognitive plasticity: a neurocognitive framework for ameliorating cognitive aging. Front Aging Neurosci 2010;2(150):1-14.

[35] Schmidt RA, Bjork RA. New conceptualizations of practice: common principles in three paradigms suggest new concepts for training. Psychol Sci 1992;3(4):207-18.

[36] Green CS, Bavelier D. Exercising your brain: a review of human brain plasticity and training-induced learning. Psychol Aging 2008;23(4):692.

[37] Churchill JD, Galvez R, Colcombe S, et al. Exercise, experience and the aging brain. Neurobiol Aging 2002;23(5):941-55.

[38] Dishman RK, Ickes W, Morgan WP. Self-motivation and adherence to habitual physical activity. J Appl Soc Psychol 1980;10(2):115-32.

[39] Conn VS, Valentine JC, Cooper HM. Interventions to increase physical activity among aging adults: a meta-analysis. Ann Behav Medicine 2002;24(3):190-200.

Tableau 1 : Caractéristiques des groupes étudiés.

	Contrôle (n = 8)		**Intervention (n = 7)**	
	M	*ET*	*M*	*ET*
Age (années)	73,7	5,5	76,4	6,2
Scolarité (années)	13,2	3,4	12,9	2,8
Indice de Masse Corporelle (kg/m2)	25,5	9,5	27,2	3,4
MMSE (nombre)	28,9	0,8	28,0	1,6
GDS 30 (nombre)	4,0	2,8	4,6	3,0
Echelle de santé (nombre)	3,4	0,7	3,3	0,5

M : Moyenne ; ET : Ecart type ; MMSE : Mini-Mental State Examination ; GDS 30 : Geriatric Depression Scale 30.

Tableau 2 : Taux de progrès (post-test – pré-test) aux tests des fonctions cognitives.

	Contrôle		Intervention		
	M	ET	M	ET	*p*
Test du Plan du Zoo					
Formulation du plan					
Temps planification (secondes)	-31,0	119,5	77,2	200,6	0,34
Temps total (secondes)	-81,6	128,3	49,1	152,2	0,28
Erreurs (nombre)	-0,5	1,1	-1,1	1,1	0,28
Score Séquence (nombre)	-0,4	3,1	2,7	3,1	0,11
Exécution du plan					
Temps planification (secondes)	-6,4	14,2	-2,8	47,4	0,48
Temps total (secondes)	-5,5	33,4	-19,2	20,6	0,46
Erreurs (nombre)	0,0	0,5	0,0	0,0	0,58
Score Séquence (nombre)	0,1	1,1	0,9	1,6	0,53
Score total (nombre)	-0,2	2,6	3,7	3,2	0,03
Test de Corsi					
Empan visuospatial (nombre)	-0,9	0,8	1,6	1,8	< 0,01
Empan visuospatial inverse (nombre)	-0,1	1,4	1,1	1,1	0,08
Empan visuospatial total (nombre)	-1,0	1,7	2,7	1,5	< 0,01
Stroop					
Condition d'interférence					
Mots (nombre)	2,7	7,4	1,1	6,2	0,73
Erreurs (nombre)	0,5	1,4	-0,3	1,1	0,37
Trail Making Test					
Temps B-A (secondes)	-6,5	53,6	-1,4	15,1	0,87

Notes. M : Moyenne ; ET : Ecart type. Pour les tests de durée et pour les nombres d'erreurs une moyenne négative correspond à une amélioration entre les pré- et les post-tests. Pour les tests de score (indiqués par nombre, sauf les erreurs), une moyenne positive correspond à une amélioration entre les pré- et les post-tests.

Tableau 3 : Taux de progrès (post-test – pré-test) aux tests des capacités fonctionnelles.

	Contrôle		Intervention		
	M	ET	M	ET	*p*
30 secondes assis debout (nombre)	-1,6	2,3	-0,7	2,2	0,60
Flexion des bras (nombre)	-0,4	1,8	0,4	2,6	0,52
Souplesse assis sur une chaise (cm)	-0,9	3,3	-1,6	4,9	0,77
Aller-retour en marchant (secondes)	1,1	0,4	-0,4	1,3	< 0,01
Gratte-dos (cm)	1,7	4,7	-0,4	3,5	0,42
2 minutes sur place (nombre)	2,6	14,6	2,1	4,5	1,0

Notes. M : Moyenne ; ET : Ecart type. Pour le 30 secondes assis debout, la flexion des bras et le 2 minutes sur place, une moyenne positive correspond à une amélioration entre les pré- et les post-tests. Pour la souplesse assis sur une chaise, l'aller-retour en marchant et le gratte-dos, une moyenne négative correspond à une amélioration entre les pré- et les post-tests.

Annexe 3. Article publié dans GeroSciences

The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot. The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults. GeroScience, 2023, 10.1007/s11357-023-00952-w . hal-04217390

HAL Id: hal-04217390
https://hal.science/hal-04217390v1

Submitted on 2 Oct 2023

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

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

The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults

Néva Béraud-Peigné [1,2,3], Pauline Maillot [3], Alexandra Perrot [1,2]

[1] CIAMS, Université Paris Saclay, Orsay, France

[2] CIAMS, Université Paris Saclay, Orléans, France

[3] I3SP, Université Paris-Cité, Paris, France

E-mail address of the corresponding author: nevabp1@live.fr

Orcid: 0000-0001-7142-540X

Information of other authors: pauline.maillot@u-paris.fr (Orcid: 0000-0002-9101-8921);

alexandra.perrot@universite-paris-saclay.fr (Orcid: 0000-0003-1246-2221).

Abstract

The aim of this study was to assess the potential of multidomain training using Immersive and Interactive Wall Exergames (I2WE) to improve the cognitive and physical functions of older adults. This new generation of exergames offers specific advantageous characteristics (e.g., immersion, virtual cognitive solicitation, high physical stimulation, complex motor skills, multiple social interactions) that could make I2WE an enjoyable multidomain training medium for older adults. A pilot study was set up with 34 participants (M = 69.91 years old). It used the pre-tests – training (3 months, 2 one-hour sessions per week for the 2 groups) – post-tests method to compare: a) the cognitive and the Dual-Task (DT) effects (primary outcomes), b) the physical effects and perceived pleasure (secondary outcomes) between an experimental group following an I2WE program (n = 19) to an active control group performing a Walking and Muscle-Strengthening (WMS) program (n = 15). While visuospatial short-term memory was improved for both groups, only I2WE training enhanced visuospatial working memory, inhibition, and DT. All physical functions, except upper body strength, were enhanced for the 2 groups. The perceived pleasure was higher for the I2WE group than the WMS group. The results of this first study have important clinical implications, showing that I2WE can optimize strategies to improve older adults' physical and cognitive health. Virtual and immersive cognitive stimulation combined with varied physical activity (i.e., aerobic, muscle-strengthening, complex motor skills) appear to be major assets of these new exergames. Moreover, the high level of perceived pleasure to I2WE makes it a promising tool for engaging older adults in sustained multidomain practice.

Keywords: exergames, physical activity, healthy aging, cognition, cognitive-motor training, dual-task

Introduction

Cognitive-motor integrity and Dual-Task (DT) capacities are crucial for maintaining walking and preventing falls [1], and thus, autonomy and quality of life of older adults. Despite this, as their physical and cognitive functions decline [2] and even though novelty and change are beneficial to maintain them, training with one modality (aerobic, muscle-strengthening) or usually combined (aerobic and/or muscle-strengthening and/or balance and/or flexibility) are usually offered to them. They improve cognitive functions [3,4], however, some researchers have pointed out [5] the necessity to extend this field to other forms of physical activity (e.g., complex motor skills, open-ended activities). An optimal combination that includes cognitive training based on enjoyable activities is also essential to anchor participants in sustainable practice. Indeed, multidomain training that combines different components (e.g., physical, motor, cognitive) can generate a synergistic effect, increasing the efficiency of training in enhancing cognitive functions [6].

New technologies, like exergames, could offer efficient and enjoyable training support. However, their effects on older adults' physical and cognitive functions are mixed and debated. Several studies have shown that they can be effective [7], greater than physical programs alone [8–10], and even better than programs combining physical and motor activities in improving mental flexibility [11], overall cognitive level [12], and DT skills [13]. However, reviews and meta-analyses [8–10] highlight a great deal of heterogeneity, which negatively impacts the conclusions. Moreover, some studies have failed to demonstrate the superiority of exergames over conventional programs [14–16] or to be ineffective [16,17]. In contrast, the development of a new generation of Immersive and Interactive Wall Exergames (I2WE) could offer the support of an efficient combined training [18], maybe more than training with one modality. However, due to their recent development, few studies have been conducted (*Play Lü* [19], *ExerCube* [20], *Neo One* [18]). I2WE creates simultaneous multidomain training, with complete physical stimulation (i.e., aerobic, muscle strengthening, and complex motor skills) and virtual continuous cognitive solicitation. More specifically, the cognitive task is

incorporated into the physical task in accordance with the *Moving While Thinking* approach [21]. Thus, the 2 tasks are linked and interactive, which could benefit older adults' cognitive functions since it can increase the synergistic effect of the combined training tenfold [22,23].

I2WE offers strong immersive capabilities that can increase session intensity [24], create lower perceived exertion [19], generate better performance [25], and amplify the activity of brain regions associated with executive functions [26]. Indeed, the cognitive stimulation of I2WE triggers greater mental concentration than conventional physical training [20] and potentiates the effects on cognition.

These new exergames could generate higher physical intensity than their older counterparts (e.g., *Wii*) or conventional physical activity. The large play area encourages energy expenditure, and participants cannot use energy-saving strategies. They must unconsciously perform complex movements during the sessions, using the whole body to achieve their goals (e.g., using the upper body to throw a ball, moving quickly to reach targets, bending to retrieve a ball from the floor). A recent study on adolescents using the *Play Lü* device [19] shows that it generates moderate to high intensity. *Neo One* wall [18] also leads to moderate to high intensity on older adults, the levels of physical intensity recommended by the ACSM [27] to generate benefits on cognitive functions [28,29].

Some I2WE can be played with up to 10 participants, naturally encouraging situations of cooperation and/or opposition [19]. These activities hold promise for improving cognitive functions in older adults [30]. Collective exergames also lead to higher intensity [19] and better results on improving functional capacities in older adults [31] compared to exergames played alone. Thus, I2WE may be a promising option with advantageous modalities to counter the limitations of conventional training and simultaneously improve cognitive, dual-task, and physical functions in the elderly.

To our knowledge, the effects of I2WE compared to Walking and Muscle-Strengthening (WMS) on cognitive, DT, and physical parameters is currently unknown, with no evidence describing which exercise is superior to improve cognitive, DT, and physical functions. Therefore, this study aimed to

compare the effects of I2WE and WMS on a) cognitive functions and DT (primary outcomes) and b) physical parameters and perceived pleasure (secondary outcomes). We hypothesized that both groups would improve their cognitive, DT, and physical measures, whereas cognitive functions would enhanced in the I2WE group to a higher degree, consistent with Kraft's theory [6] of the synergistic effect of combined training.

Methods

Population

Potential participants were contacted via mail, flyers, and call for participation in the Montreuil city (France) newspaper, and recruitment of participants was conducted between December 2021 and February 2022. A power analysis, using G*Power version 3.1.9.7, based on the primary statistical test planned for this study (2 × 2 within-between interaction ANOVA) revealed that a sample size of 34 participants was needed ($\alpha = .05$; power = .80; effect size: $\eta^2 = .06$). The dropout level was assumed to be 15 % so 40 community-dwelling older adults were recruited from Seine-Saint-Denis, France, volunteered to participate. All participants gave their written informed consent and were not compensated for their participation. The study was approved by the Polethis research ethics committee (CER-PS n°462). Participants met the following inclusion criteria: (a) be over 60 years old, (b) have a MMSE [32] score above 27, (c) engage in less than 2.5 hours of physical activity per week assessed by the QAPPA [33], (d) score 3 or higher on a subjective health scale (1= very poor to 5= very good), (e) be retired, (f) have no major pathology, (g) have normal or corrected vision and hearing, (h) have no difficulty bending or using their shoulders, (i) do not play video games or exergames, (j) present a medical certificate not contraindicating physical activity). They did not know in advance which group they would be included in.

Study design

This study was a single-center interventional study wherein participants were randomized into one of two groups (I2WE or WMS). The randomization was carried out in single-blind conditions: participants did not know their group in advance, and the researcher was not blinded. The allocation of participants between groups was done as the participants were included in the study according to 2 criteria: a) the equality in terms of age between the 2 groups and b) the availability of participants (randomization was not performed with a software). The pre- and post-tests were carried out just before the start and just after the end of the program, so there was a 13-week gap. The researcher who administered the tests had a bachelor's and a master's degree, specialized in physical activity for aging, and was trained to administer the tests.

The cognitive, dual-task, and physical tests took around 1h30 per participant. Cognitive tests were performed first, followed by physical tests. They were carried out in a quiet room. A break of about 3 minutes was observed between each test to manage the participant's mental fatigue and attention effect. In addition, the participant was regularly asked if they needed an extra break and if they felt ready to start another test. All participants took the tests in the same order, before and after the programs, to control the mental fatigue effect.

Outcomes

Primary outcome measures

The cognitive and DT battery

The French version [34] of **the Zoo Map Test** is from the Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome [35], a validated ecological test battery assessing planning ability [36]. To our knowledge, no test-retest coefficients are available for the population studied in this research. The participant indicated the route to take to visit a series of places on a map, avoiding making mistakes. In the *formulation of the plan* part, the participant organized their own travel. In the *execution of the plan*

part, they followed instructions. For each condition, the *total time* and the *sequence score* out of 8 points were collected for a total score out of 16 points.

The Spatial Span Test is a reliable and valid subtest of the Wechsler Memory Scale [37], with an acceptable internal consistency (Cronbach's α = .61) [38] and test-retest reliability for 60 to 79 years old ranging from .52 to .65 [39]. In the first part, which assesses visuospatial short-term memory, the participant reproduces a sequence of cubes designated by the examiner in the same order. In the second, which assesses visuospatial working memory, the participant reproduces a sequence of movements in reverse order. The number of cubes increases progressively and determines the *spatial span* and the *backward spatial span*. For each level, the participant always performed 2 trials and scored 1 point for each successful trial. The test ended when 2 errors were made at the same level.

The Stroop Test [40] was used to assess inhibition. It has good reliability (.75 for Board 1, .82 for Boards 2 and 3 [41]) and validity [42]. Each board contained 100 items divided into 10 columns. Only the first 3 boards were kept: the *naming condition*, which contained colored rectangles, the *reading condition*, with color words appearing in black ink and the *interference condition*, which contained color words, appearing in a color different from their meaning. In all 3 conditions, the performance measure was the number of correct responses in 45 seconds. The interference score measure was calculated as follows: board 3 score/(mean of board 1 and 2 scores).

The Mental Rotation Test [43] assesses visuospatial abilities. This valid test displayed substantial internal consistency (KR-20 = .88) and a high test-retest reliability (r = .83) [43]. Twenty figures were presented as 2-dimensional visual images. A model was placed at the left end of the line, and 4 structures were located to the right of the model. The participant was asked to indicate which ones were the same figure as the model, taking rotation into account. The score was the number of correct items given in 6 minutes.

The Trail Making Test (TMT) [44] assesses cognitive flexibility, with high test-retest reliability for Part A (r = .74), part B (r = .85), and B-A (r = .74) [45]. Part A involves linking a series of increasing numbers from 1 to 25 by selecting the appropriate number. In part B, the participants connect 2 series of symbols in alternation: 1 of numbers and 1 of letters. This had to be done as quickly as possible without lifting the pen from the paper. If mistakes were made, the examiner informed the participant, who had to correct them. Following Corrigan and Hinkeldey's method [46], flexibility was highlighted specifically by analyzing the time difference in the result B-A, a purer measure of flexibility. Most recently, Sánchez-Cubillo and collaborators confirmed that B-A time minimizes the visuoperceptual and working memory demand of TMT A and TMT B, providing a pure indicator of task-switching [47].

Dual-Task Test (DT). The *single recall task* and *TUG in the dual task (TUG-dt)* tests were used to evaluate the DT. This test was designed for study purposes, so there were no data available to confirm its validity and/or reliability. For the *single recall task, the* examiner said 7 numbers aloud, at a rate of 1 number per second, which the participant repeated immediately after. For the *TUG-dt,* the participant had to simultaneously perform the single recall task and the TUG test (detailed below). Two scores were calculated: the difference between digits given in DT and Single Task (ST) and the difference between the time to complete the task in DT and ST.

Secondary outcome measures

The physical battery

Physical tests were carried out in the following order: a) Chair stand, b) Chair-sit-and-reach, c) Handgrip, d) TUG Test, e) Back scratch, f) Seated Medicine Ball Throw, g) 6-minutes Walking Test. This order ensures that no two functions (e.g., strength, flexibility) and/or body parts (e.g., upper body, lower body) were required in succession. Five tests [i.e., chair-stand, chair-sit-and-reach, Timed Up and Go *(TUG),* Back scratch, 6-minutes Walking Test *(6WT)]*, derived from the French version [48] of

the *Senior Fitness Test* [49] were used to assess respectively lower body strength, flexibility, dynamic balance, and endurance.

Chair-stand Test. The participant had to stand and sit up as many times as possible in 30 seconds. The arms were crossed on the chest, the feet always remained on the ground. The number of chair-stands was recorded.

Chair-sit-and-reach Test. Sitting on the edge of a chair, one leg straight, the other bent, the participant had to bring their hand as close as possible to the foot of the straight leg. The number of centimeters between the hand and the foot was measured. The values were negative if the fingers of the hand extended beyond the toes.

TUG Test. The participant had to get up from a chair, walk around a block located in front of them, 3 meters away, and sit down again as quickly as possible. The time to complete this course was recorded.

Back scratch Test. The participant had to bring their two hands as close together as possible (one hand reaching over the shoulder, palm against the back, the other reaching to the middle of the back, back of the hand against the back). The number of centimeters between both hands was measured. The values were negative if the fingers of the two hands crossed.

6WT. The participant was asked to walk as far as possible, in 30-meter round trips, for 6 minutes. The distance was recorded, as well as the heart rate, to determine the intensity of the effort.

Two upper-body strength tests (i.e., Handgrip test [50], Seated Medicine Ball Throw [51]) were added to complete the physical assessment.

Handgrip Test. The participant was standing and had to squeeze the dynamometer with maximum isometric effort, maintained for about 5 seconds. The force created, measured in kilograms, was recorded for both arms. The experimental protocol included a practice trial, followed by three attempts

for each side in alternation, with 30 seconds rest between them. The best of the three trials for each hand was considered for analysis.

Seated Medicine Ball Throw Test. Sitting in a chair, back against the back of the chair, feet flat on the floor, the subject had to throw a 3kg medicine ball as far as possible with both hands, starting from the chest. The distance between the subject and the medicine ball was recorded.

The questionnaires

The French version [52] of *the* ***Physical Activity Enjoyment Scale*** [53] with a scale from *absolutely disagree* (1) to *completely agree* (7) was used to evaluate the perceived pleasure. The score was between 7 and 70.

The feeling questionnaire. It was completed at the end of the program. It consisted of 4 questions in the form of a scale from 1 to 5 concerning (a) the difficulty of the sessions, (b) their physical and (c) cognitive developments, and (d) the desire to continue a program of this type.

Intervention

The 2 programs were implemented between February and May 2022 in a sports center in Montreuil (France). The workload was the same between groups: programs were composed of bi-weekly one-hour group sessions over 12 weeks (24 sessions) at a moderate intensity. The Heart Rate (HR) was measured during all sessions using the Polar Verity Sense heart rate monitor placed on the biceps and the perceived exertion using the modified Borg scale [54]. The Heart Rate Reserve (HRR), the difference between the Maximum Theoretical Heart Rate (MTHR = 192 - 0.007 x age², [55]) and the RHR, is used to calculate exercise intensity. For all sessions, the mean intensity was calculated [(Average Heart Rate - RHR)/HRR] x 100]. A sport therapist supervised the sessions, explaining and demonstrating the exercises, monitoring the participants' safety and correct posture, and encouraging and providing feedback to the participants. There were no activities to increase compliance.

The Immersive and Interactive Wall Exergames (I2WE) program was performed using the *Neo One* device described in Figure 1 and more detailed in this recent study [18]. This I2WE was chosen because of the variety and quality of the games offered, which are accessible to older people [18]. The sessions consisted of 10 minutes of warmup, 40 minutes of the main session using the *Neo One* device, and 10 minutes of cooldown with full body stretching exercises in groups of 4 participants (defined according to the availability of the participants, age, physical and cognitive capacities). The intensity of body workout was moderate (46.97% HHR). Five to 7 five-minutes games were selected from among 15 games [see Additional file 1 for a description of the games]. Various materials were used (e.g., basketball and handball balls, balloons, chairs, hoops, rhythm scales). The games were made more complex by selecting levels (easy, normal, hard) and by adding extra exercises to create cooperative and/or oppositional situations to the games where they were not initially implemented and to increase the physical and/or motor complexity [see Additional file 2].

In every other session, participants of the I2WE group played the *Break It Handball* game individually to measure their capacity to progress in *Neo One* games and to evaluate if they were improving in the training underlying their learning. For 2 minutes, the players had to throw the ball at different targets on the wall. They received immediate feedback on their scores.

The Walking and Muscle-Strengthening (WMS) program was held in groups of 5 to 8 participants (split according to the same criteria as the I2WE group) in the parks of the city of Montreuil, with flat and gradient courses that were used alternately. Participants spent 45 minutes walking and 15 minutes in muscle-strengthening exercises, during which they performed an average of 4881.59 steps (SD = 218.73), measured by standard pedometers. The intensity was 43.90% of the HRR (moderate intensity). The muscle-strengthening exercises were performed using either body weights or small equipment (e.g., balls, elastic bands, rhythm scales) or street furniture (e.g., benches, trees, steps). Approximately 3 to 5 exercises were performed, consisting of 2 to 3 sets of 10 to 20 repetitions.

Data analysis

The analyses were performed using JASP software. Before completing any inferential statistical tests, all relevant assumptions were checked, and if they were met, statistical analysis was allowed to proceed. Measures of variance used were Standard Deviation (SD). The equivalent of I2WE and WMS groups before the program was checked using a *t*-test. For cognitive, DT, and physical tests, repeated ANOVA measures were used to test the interaction between pre-test and post-test x training group (I2WE, WMS) and were completed by 95% Confidence Intervals for mean difference (between pre- and post-tests or between I2WE and WMS). All statistical analyses with a *p*-value < .05 were considered significant. A Bonferroni Post Hoc test was realized if a significant interaction was found. Only the *p*-values from the Post Hoc tests were Bonferroni-corrected. Effect Sizes were calculated to study the power of the results: Eta-Squared for ANOVA and Cohen's d for *t* test. To test the reliability of results, Reliable Change Indexes (RCIs) were calculated according to the method presented in Duff's work [56]. The calculation was as follows:

$$\text{RCI} = \frac{T_2 - T_1}{\sqrt{(2S_{21}(1-r_{12}))}}$$

T_1 = mean score at pre-test, T_2 = mean score at post-test, S_1 = standard deviation at pre-test, r_{12} = correlation between T1 and T2. Calculation of the RCI results in a z-score, which needs to be compared with a normal distribution table to be interpreted. Within the existing literature, a z-score of +1.645 or -1.645 would be considered a "reliable change". Correlation analysis was also performed using Spearman correlation, and the potential difference in perceived pleasure between the two groups was tested with a *t*-test.

Results

Participants

The study workflow is shown in Figure 2. 34 participants (26 women) completed the study, and there were no significant differences between the 2 groups in age, years of education, BMI, Resting Heart

Rate (RHR), subjective health, MMSE, QAPPA scores (Table 1) and between all pre-test (Additional file 3 and 4).

Effects of the programs

Primary outcome

Cognitive and DT assessments

The results obtained in the pre- and post-tests for cognitive functions, DT, and the results on simple time and time*group interaction effects from ANOVA are given in Table 2, the results on Post-Hoc Tests are given in Additional file 5, and those of RCI in Additional file 6.

Spatial Span test. Both groups significantly improved their *spatial span*: there was a significant time effect ($p = .02$), with no time*group interaction or group effect ($p = .44$). Post Hoc Comparison for time effect was significant ($p = .02$, d = .43). For the *backward spatial span*, only participants in the I2WE group improved their score. There was a significant time ($p < .001$) and a time*group interaction ($p = .01$) effect, with no group effect. Post Hoc analysis revealed a significant difference between pre- and post-tests for the I2WE group ($p < .001$, d = 1.04) and none for the other comparisons.

Stroop Test. The I2WE group improved its *interference score* and *words in board 3* after the program, while the WMS group did not, confirmed by the significant score*group interaction for the interference score ($p = .01$), with no simple time or group effect. Post Hoc analysis indicated a significant difference between the pre- and post-test for the I2WE group ($p = .05$, d = .50) and none for the WMS group. For the *words in board 3*, there was also a score*group interaction ($p = .03$). Post Hoc analysis showed a significant difference between pre- and post-tests for the I2WE group ($p = .05$, d = .33).

Dual-Task Test. The I2WE group improved its time on DT compared to ST after the program, while the WMS group did not. There was a significant time effect (p = .01) and a significant score*group interaction (p = .04) with no group effect. Post Hoc analysis revealed a significant difference between pre- and post-tests for the I2WE group (p = .01, d = 1.02) and none for the other comparisons.

TMT. The score*group interaction effect was nearly significant (p = .06), but Post Hoc analysis revealed no significant differences.

For all cognitive tests, RCI values indicated that changes were unreliable (none RCIs were between -∞ and -1.645 or between ∞ and 1.645).

Secondary Outcomes

Physical assessment

The results of the pre- and post-tests for physical abilities and the results on simple time effects from ANOVA are given in Table 3 and those of RCI in Additional file 7. Seven measures had a time effect (p < .01 or p < .001) but no group effect or time*group interaction effect.

For all physical tests, RCI values indicated that changes were unreliable (none RCIs were between -∞ and -1.645 or between ∞ and 1.645).

Evolution of Break It Handball performance

The I2WE group improved their scores, with a significant time effect (F(11,66) = 7.27, p < .001, η^2 = 0.55). Post Hoc analysis indicated a significant difference between score 1 and score 9 (p = .04), scores 1 and 10 (p = .01), 1 and 11 (p < .001), and 1 and 12 (p < .001) as indicated in Additional file 8.

The link between the evolution of DT performance and Break It Handball performance.

The evolution score of the game performance (score 12–score 1) score was calculated to test the correlation with the change in cognitive test scores (post-test–pre-test). The change in the percentage of time spent in DT versus ST was positively correlated with the change in game performance (r = .56, p = .01). There were no other correlations with changes in cognitive tests.

Compliance

Compliance was 91.01% (415 sessions out of 456) for the I2WE program versus 85.28% (307 sessions out of 360) for the WMS program. *Perceived pleasure* was significantly higher ($t(32) = 2.34$, p = .03, d = 0.81) for the I2WE group who scored 63.74 ± 6.04 to 59.57 ± 4.82 for the WMS group. All participants wanted to continue their respective programs. For the I2WE group, 10.53% had a moderate, 36.84% a strong, and 52.63% a very strong desire to continue. For the WMS group, 33.33% had a moderate and 66.67% a strong desire. For physical evolution, 84.21% of the participants in the I2WE group (21.05% very positive) and 93.33% in the WMS group (6.67% neutral) felt a positive change. For cognitive evolution, 78.95% of the I2WE group (21.05% neutral) compared to 20% (80% neutral) of the WMS group felt a positive change. As shown in Table 4, there were no significant differences between effort intensities of the WMS and I2WE groups.

Discussion

This study aimed to compare the cognitive, dual-task, and physical effects of an Immersive and Interactive Wall Exergames program (I2WE) to a Walking and Muscle-Strengthening (WMS) in healthy but inactive older adults.

The effects of programs differ on cognitive and DT capacities, with an advantage for the I2WE group with small to medium effects. Two of the 4 executive functions tested (i.e., visuospatial working memory, inhibition) and DT capacity were enhanced only for the I2WE group. The increase of mental flexibility specific to I2WE group participants was also nearly significant (p = .06), and visuospatial

short-term memory improved for participants in both groups. However, these improvements were not confirmed by RCIs.

Since physical activity, moderate-intensity aerobic, and muscle strengthening were the only same stimulation between the 2 groups, their similar improvement in visuospatial short-term memory could be the consequence. Indeed, physical activity enhances cognitive functions [4] and memory [57]. The benefits of aerobic programs on improving cardiorespiratory health are already known, allowing for better cognitive efficiency [58–60] thanks to better oxygenation of the central nervous system and increased neurogenesis through neurotrophic growth factors. Erickson and his collaborators [57] showed a 2% increase in hippocampal volume and BDNF levels, associated with improvement in spatial memory performance after an aerobic program. Thus, changes in visuospatial short-term memory in both groups may have been driven by aerobic physical activity. Several researchers have emphasized that the aerobic effect is more important for executive functions [4], whereas here, only visuospatial short-term memory was improved for both groups. It may have been sensitive more quickly, and the programs may not have been long/high frequency enough to improve the other functions, whereas these 2 are fundamental to have an effect on executive efficiency [61]. In addition, the strength training that all participants received could also mediate the positive changes in visuospatial short-term memory [62,63]. Cassilhas and collaborators [64] found an increase in IGF-1 related to resistance training coinciding with improved cognition.

Except for one function, the benefits of aerobic physical activity combined with muscle-strengthening did not explain the superior cognitive variation of the I2WE group in inhibition, visuospatial working memory, and DT. Other multidimensional mechanisms (i.e., complex physical training, rich cognitive training, combined training, cooperative and oppositional activity) inherent to the characteristics of I2WE (see Figure 3) could have been responsible.

I2WE are complex physical training that solicited coordination, dynamic balance as well as flexibility through large freedom of movement triggered different structural adaptations linked to distinct

cognitive functions [65]. Already in 2003, Colcombe and Kramer [4] stated that programs combining endurance, muscle strengthening, flexibility, and balance were the most effective for improving executive functions. The richness of physical stimulation and motor complexity could produce greater cognitive benefits [4,5] and encourage transfer effects [21].

In addition to complex physical stimulation, I2WE provide rich cognitive solicitation. Fissler and colleagues [66] stipulated that "*novelty interventions*", including video games that were novel and optimally calibrated in difficulty, combined with high variability of the training task stimulated broad processes. These benefits could be increased by the addition of physical stimulation [66], generating effects on non-specific cognitive skills such as those found in this study. Indeed, the I2WE games solicited diverse cognitive processes, with more than 15 games associated with different gameplay. For example, players were required to retain information to be as efficiently as possible (short-term and working memory), to combine a motor and a cognitive task (DT), to ignore certain details to focus on critical information (inhibition), all while analyzing multiple visuospatial stimuli (visuospatial functions), to switch quickly from one information to another (mental flexibility) as well as to plan their action and strategies (planning). However, these last 3 functions were not improved while these are usually sensitive to training using video games [3] and exergames [10]. Cognitive enrichment could be dependent on the specificity of the video game [3], which implies that these 3 functions were not engaged intensively and/or frequently enough by I2WE. In 2008, Basak and collaborators [67] did not obtain the same increases in visuospatial skills using a strategy game as Green and Bavelier [68] did with action video games. Thus, the characteristics of the games could be directly related to the types of processes that were modified [69]. The transfer was not as general as claimed by Fissler and collaborators' theory [66]. This could explain the discordance in the ability of exergames to improve cognitive functions. Given low levels of evidence from meta-analysis, studies on exergames should focus on an accurate description of the games used and on their specific cognitive stimulation. In addition to cognitive stimulation, the strong immersive capabilities of I2WE provided an adequate training environment. The combination of exergames and immersive virtual environments could

increase the efficiency of training on brain health [70]. Immersion could amplify the activity of brain regions associated with executive functions [26] and create higher mental focus than a conventional physical activity session [20]. Furthermore, I2WE is an alternative to head-mounted virtual reality, which can negatively affect older adults, including nausea, dizziness, and malaise [71]. These could be particularly dangerous for older persons, who have a greater propensity for falls and loss of balance. No negative events, including those related to cybersickness, occurred during the program despite repeated exposure to the immersive wall, and the User Experience is positive [18]. This mixed reality offered by the I2WE represent a compromise to increase the efficiency of multidomain training without generating negative events.

I2WE offered a physical and cognitive combination through the DT. Several studies have shown that DT performance could be improved when stimulated and strengthened by the transfer of learning to new tasks [72]. In the present study, DT skills were enhanced in the I2WE group, with a high size effect, and were correlated to improved game performance. Thus, it is enhanced by the I2WE practice and necessary to perform in the games. They generated positive effects even when the tasks used in the test differed from the training situations, so-called "*learning to learn*" [73]. These DT abilities are crucial to the quality of life of older adults, especially to maintain walking and preventing falls [1]. Combined training created by I2WE could have a synergistic effect and be more efficient in improving cognitive functions in older adults [6]. Indeed, physical activity could "facilitate" neuroplasticity, reflected by both groups' improvement in visuospatial short-term memory. The additional cognitive stimulation of the I2WE group may have "guided" these effects [66], resulting in enhancement in other cognitive processes, such as executive functions and DT. An additional advantage is that the cognitive task was embedded simultaneously with the motor task and could be more promising to increase the cognitive reserve [21,66]. This *Moving While Thinking* approach prevented older adults from using adaptive strategies to prioritize one task over another (posture first phenomenon). They often protect their motor function at the expense of the cognitive task when a situation involves a

threat to balance [74], which could affect the intensity of physical and/or motor stimulation. With I2WE, participants were forced to engage in a motor task to perform the cognitive task and vice versa.

The original characteristics of this new type of exclusively collective exergames created a social bond between players, thanks to cooperative and oppositional situations. Participants must communicate, develop strategies, and plan together to perform in the games, creating important cognitive engagement.

Thanks to its specific characteristics, this new generation of exergames generated cognitive benefits superior to those of conventional physical activity programs. It can be applied for prevention, as was done in this study, and could also be used in rehabilitation, re-education environments (e.g., hospitals), and care facilities (e.g., residences) for older adults.

At the physical level, almost all capacities benefited from the programs, with no differences in evolution between the 2 groups. Like conventional exergames [8,75] and physical activity, I2WE improved multiple physical functions. Thus, they are an interesting successor to the insufficient first generation of exergames, some of which did not solicit physical capacities sufficiently to lead to improvements [76,77]. As Janhunen and collaborators [78] reported, exergames have the same physical effect as physical activity. I2WE involve complex motor skills, which could have led to greater improvements in physical function or higher intensity than a conventional program. Nevertheless, the intensity was the desired one (i.e., moderate), and an intensity too high could have negative effects, such as the impossibility of adequately performing the physical task and the cognitive task.

Only upper body strength was unchanged for both groups, which may have been due to the lack of solicitation: ball throws for the I2WE group and swinging movements of the arms during walking for the WMS group. Still, as 82.21% of the participants felt, this new exergame improved a wide range of physical functions, like conventional physical training. This is positive for maintaining the daily

functioning and quality of life of older adults since muscle strength and physical performance are predictive of decline in daily living activities [79].

I2WE training is effective in improving the participants' performance in the games, as they showed a significant increase in the *Break It Handball* game. These encouraging results are accompanied by a very high level of compliance and the desire of all participants, very strong for 52.63%, to continue their program. This may have been due to the perceived pleasure provided by I2WE. While a preliminary study [18] had already shown that these games created a high level of perceived pleasure (60.71/70), these results were confirmed here with an even higher score of perceived pleasure evaluated by the same questionnaire and significantly higher than the WMS group. The collective [80] and the playful aspect of video games were fun factors. In line with the findings of Graves and collaborators [81] showing that the Wii generated more pleasure than conventional physical activity, I2WE are enjoyable and promising alternatives for training.

The main limitation of this study concerned the small number of comparative groups, which made it difficult to determine the specific benefits of I2WE multidimensional characteristics. Moreover, to our knowledge, no studies have evaluated the effects of this type of program on older adults. The results obtained were compared with those in the literature on physical activity, cognitive, exergames, and combined training, but not specifically with I2WE. This limited the extent to which the results could be compared to the literature. Furthermore, it would have been interesting to perform retention tests to determine whether this new type of exergame could extend the benefits to a greater extent and/or for a longer time than a conventional program. Sustained effects after the programs need further research, as they play a key role in the context of clinical relevance. Finally, the lack of a passive control group did not counteract the practice effects of the tests. Nevertheless, validated and reliable tests commonly used in this population were selected, and there was a long delay between pre- and post-tests. In addition, differences between pre and post-tests were evaluated with mean comparison tests and interpreted by effect sizes, confidence intervals, and RCIs. However, the results of inferential tests and

RCIs were contradictory. On the one hand, inferential statistics and effect sizes can overestimate results, notably due to measurement error and/or practice effects. On the other hand, RCIs can be criticized, mainly because they do not consider the practice effects, test reliability, and variability of results in post-tests. Therefore, the results of this study must be interpreted with caution. More research is needed to determine what constitutes real change. Should change be assessed using inferential statistics or RCI? In any case, improvements were noted in this study, particularly about the dual task, which represents a real-life ability and could be a "true" change, as Duff and colleagues [56] indicated.

This study is the first to show the effects of this new generation of exergames on the cognitive and physical health of older adults, although the reliability of the results has yet to be confirmed by further studies. I2WE produced benefits across a wide range of physical functions comparable to a conventional physical activity program and superior in DT, visuospatial working memory, and inhibition with small to medium effects. It suggests that I2WE has advantageous characteristics representing a solution to introduce the practice of regular physical activity into the lives of initially inactive older adults while stimulating their cognitive functions.

Statements and Declarations

Sources of Funding

No funding was received for this study.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Acknowledgments

The authors thank the city of Montreuil and the company NeoXperiences for providing the premises and the *Neo One* wall.

References

[1] Pichierri G, Murer K, De Bruin ED. A cognitive-motor intervention using a dance video game to enhance foot placement accuracy and gait under dual task conditions in older adults: a randomized controlled trial. BMC Geriatr 2012;12:1–14. https://doi.org/10.1186/1471-2318-12-74.

[2] Daley MJ, Spinks WL. Exercise, Mobility and Aging. Sports Med 2000;29:1–12. https://doi.org/10.2165/00007256-200029010-00001.

[3] Bediou B, Adams DM, Mayer RE, Tipton E, Green CS, Bavelier D. Meta-analysis of action video game impact on perceptual, attentional, and cognitive skills. Psychol Bull 2018;144:77–110. https://doi.org/10.1037/bul0000130.

[4] Colcombe S, Kramer AF. Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta-Analytic Study. Psychol Sci 2003;14:125–30. https://doi.org/10.1111/1467-9280.t01-1-01430.

[5] Torre MM, Temprado J-J. A Review of Combined Training Studies in Older Adults According to a New Categorization of Conventional Interventions. Front Aging Neurosci 2022;13:808539. https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.808539.

[6] Kraft E. Cognitive function, physical activity, and aging: Possible biological links and implications for multimodal interventions. Aging Neuropsychol Cogn 2012;19:248–63. https://doi.org/10.1080/13825585.2011.645010.

[7] Maillot P, Perrot A, Hartley A. Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. Psychol Aging 2012;27:589–600. https://doi.org/10.1037/a0026268.

[8] Howes SC, Charles DK, Marley J, Pedlow K, McDonough SM. Gaming for Health: Systematic Review and Meta-analysis of the Physical and Cognitive Effects of Active Computer Gaming in Older Adults. Phys Ther 2017;97:1122–37. https://doi.org/10.1093/ptj/pzx088.

[9] Soares VN, Yoshida HM, Magna TS, Sampaio RAC, Fernandes PT. Comparison of exergames versus conventional exercises on the cognitive skills of older adults: a systematic review with meta-analysis. Arch Gerontol Geriatr 2021;97:104485. https://doi.org/10.1016/j.archger.2021.104485.

[10] Stanmore E, Stubbs B, Vancampfort D, de Bruin ED, Firth J. The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations: A meta-analysis of randomized controlled trials. Neurosci Biobehav Rev 2017;78:34–43. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.011.

[11] Kayama H, Nishiguchi S, Yamada M, Aoyama T, Okamoto K, Kuroda T. Effect of a Kinect-based exercise game on improving executive cognitive performance in community- dwelling elderly. J Med Internet Res 2014;16:e61. https://doi.org/10.4108/icst.pervasivehealth.2013.252253.

[12] Htut TZC, Hiengkaew V, Jalayondeja C, Vongsirinavarat M. Effects of physical, virtual reality-based, and brain exercise on physical, cognition, and preference in older persons: a randomized controlled trial. Eur Rev Aging Phys Act 2018;15:10. https://doi.org/10.1186/s11556-018-0199-5.

[13] Peng H-T, Tien C-W, Lin P-S, Peng H-Y, Song C-Y. Novel Mat Exergaming to Improve the Physical Performance, Cognitive Function, and Dual-Task Walking and Decrease the Fall Risk of Community-Dwelling Older Adults. Front Psychol 2020;11:1620. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01620.

[14] Gavelin HM, Dong C, Minkov R, Bahar-Fuchs A, Ellis KA, Lautenschlager NT, et al. Combined physical and cognitive training for older adults with and without cognitive impairment: A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. Ageing Res Rev 2021;66:101232. https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101232.

[15] Ogawa EF, You T, Leveille SG. Potential Benefits of Exergaming for Cognition and Dual-Task Function in Older Adults: A Systematic Review. J Aging Phys Act 2016;24:332–6. https://doi.org/10.1123/japa.2014-0267.

[16] Sala G, Semir K, Gobet F. Still No Evidence That Exergames Improve Cognitive Ability: A Commentary on Stanmore et al. (2017). Neurosci Biobehav Rev 2021;123:352–3. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.11.015.

[17] Ordnung M, Hoff M, Kaminski E, Villringer A, Ragert P. No Overt Effects of a 6-Week Exergame Training on Sensorimotor and Cognitive Function in Older Adults. A Preliminary Investigation. Front Hum Neurosci 2017;11:160. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00160.
[18] Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults. Games Health J 2022. https://doi.org/10.1089/g4h.2022.0075.
[19] Roure C, Lentillon-Kaestner V, Fargier P. The effects of a Play Lü inter-team competition exergame on adolescents' moderate-to-vigorous physical activity and situational interest, XChange Virtually, England: 2021.
[20] Martin-Niedecken AL, Rogers K, Turmo Vidal L, Mekler ED, Márquez Segura E. ExerCube vs. Personal Trainer: Evaluating a Holistic, Immersive, and Adaptive Fitness Game Setup. Proc. 2019 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst., Glasgow Scotland Uk: ACM; 2019, p. 1–15. https://doi.org/10.1145/3290605.3300318.
[21] Herold F, Hamacher D, Schega L, Müller NG. Thinking While Moving or Moving While Thinking – Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. Front Aging Neurosci 2018;10:228. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00228.
[22] Anderson-Hanley C, Barcelos NM, Zimmerman EA, Gillen RW, Dunnam M, Cohen BD, et al. The Aerobic and Cognitive Exercise Study (ACES) for Community-Dwelling Older Adults With or At-Risk for Mild Cognitive Impairment (MCI): Neuropsychological, Neurobiological and Neuroimaging Outcomes of a Randomized Clinical Trial. Front Aging Neurosci 2018;10:76. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00076.
[23] Pellegrini-Laplagne M, Dupuy O, Sosner P, Bosquet L. Effect of simultaneous exercise and cognitive training on executive functions, baroreflex sensitivity, and pre-frontal cortex oxygenation in healthy older adults: a pilot study. GeroScience 2022. https://doi.org/10.1007/s11357-022-00595-3.
[24] Finkelstein S, Suma EA. Astrojumper: Motivating Exercise with an Immersive Virtual Reality Exergame. Presence Teleoperators Virtual Environ 2011;20:78–92. https://doi.org/10.1162/pres_a_00036.
[25] Murray EG, Neumann DL, Moffitt RL, Thomas PR. The effects of the presence of others during a rowing exercise in a virtual reality environment. Psychol Sport Exerc 2016;22:328–36. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2015.09.007.
[26] Kober SE, Kurzmann J, Neuper C. Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG study. Int J Psychophysiol 2012;83:365–74. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.12.003.
[27] Swain DP, ACSM, Brawner CA. ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
[28] Audiffren M, André N, Albinet C. Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors : bilan et perspectives. Rev Neuropsychol 2011;3:207–25. https://doi.org/10.3917/rne.034.0207.
[29] Smith PJ, Blumenthal JA, Hoffman BM, Cooper H, Strauman TA, Welsh-Bohmer K, et al. Aerobic Exercise and Neurocognitive Performance: A Meta-Analytic Review of Randomized Controlled Trials. Psychosom Med 2010;72:239–52. https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3181d14633.
[30] Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. Impact d'un programme d'activité physique de coopération et d'opposition sur les fonctions cognitives de personnes âgées. NPG Neurol - Psychiatr - Gériatrie 2022;22:149–57. https://doi.org/10.1016/j.npg.2021.08.002.
[31] Da Silva Júnior JLA, Biduski D, Bellei EA, Becker OHC, Daroit L, Pasqualotti A, et al. A Bowling Exergame to Improve Functional Capacity in Older Adults: Co-Design, Development, and Testing to Compare the Progress of Playing Alone Versus Playing With Peers. JMIR Serious Games 2021;9:e23423. https://doi.org/10.2196/23423.
[32] Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. "Mini-mental state." J Psychiatr Res 1975;12:189–98. https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6.
[33] de Souto Barreto P, Ferrandez A-M, Saliba-Serre. B. Questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées (QAPPA) : validation d'un nouvel instrument de mesure en langue française. Sci Sports 2011;26:11–8. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2010.09.006.

[34] Allain P, Chaudet H, Nicoleau S, Etcharry-Bouyx F, Barré J, Dubas F, et al. Étude de la planification de l'action au moyen du test du plan du zoo dans la maladie d'Alzheimer. Rev Neurol (Paris) 2007;163:222–30. https://doi.org/10.1016/S0035-3787(07)90393-8.
[35] Wilson BA, Evans JJ, Emslie H, Alderman N, Burgess P. The Development of an Ecologically Valid Test for Assessing Patients with a Dysexecutive Syndrome. Neuropsychol Rehabil 1998;8:213–28. https://doi.org/10.1080/713755570.
[36] Oosterman JM, Wijers M, Kessels RPC. Planning or Something Else? Examining Neuropsychological Predictors of Zoo Map Performance. Appl Neuropsychol Adult 2013;20:103–9. https://doi.org/10.1080/09084282.2012.670150.
[37] Wechsler D. WMS-III: Wechsler memory scale administration and scoring manual. Harcourt Brace&Co. San Antonio: The Psychological Corporation; 1997.
[38] Busch R, Farrell K, Lisdahl-Medina K, Krikorian R. Corsi Block-Tapping Task Performance as a Function of Path Configuration. J Clin Exp Neuropsychol 2005;27:127–34. https://doi.org/10.1080/138033990513681.
[39] Lo AHY, Humphreys M, Byrne GJ, Pachana NA. Test-retest reliability and practice effects of the Wechsler Memory Scale-III: Test-retest reliability and practice effect in WMS-III. J Neuropsychol 2012;6:212–31. https://doi.org/10.1111/j.1748-6653.2011.02023.x.
[40] Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. J Exp Psychol 1935;18:643–62. https://doi.org/10.1037/h0054651.
[41] Lemay S, Bédard M-A, Rouleau I, Tremblay P-L. Practice Effect and Test-Retest Reliability of Attentional and Executive Tests in Middle-Aged to Elderly Subjects. Clin Neuropsychol 2004;18:284–302. https://doi.org/10.1080/13854040490501718.
[42] MacLeod CM. Half a Century of Research on the Stroop Effect: An Integrative Review 1991.
[43] Vandenberg SG, Kuse AR. Mental Rotations, a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization. Percept Mot Skills 1978;47:599–604. https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599.
[44] Reitan RM. Manual for administration and scoring of the Halstead–Reitan of neuropsychological test battery for adults and children. 1979.
[45] Giovagnoli AR, Del Pesce M, Mascheroni S, Simoncelli M, Laiacona M, Capitani E. Trail making test: normative values from 287 normal adult controls. Ital J Neurol Sci 1996;17:305–9.
[46] Corrigan JD, Hinkeldey NS. Relationships between Parts A and B of the Trail Making Test. J Clin Psychol 1987;43:402–9. https://doi.org/10.1002/1097-4679(198707)43:4<402::AID-JCLP2270430411>3.0.CO;2-E.
[47] 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;15:438–50. https://doi.org/10.1017/S1355617709090626.
[48] Fournier J, Vuillemin A, Le Cren F. Mesure de la condition physique chez les personnes âgées. Évaluation de la condition physique des seniors : adaptation française de la batterie américaine « Senior Fitness Test ». Sci Sports 2012;27:254–9. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2012.07.005.
[49] Rikli RE, Jones CJ. Development and Validation of a Functional Fitness Test for Community-Residing Older Adults. J Aging Phys Act 1999;7:129–61. https://doi.org/10.1123/japa.7.2.129.
[50] Bohannon RW, Schaubert KL. Test–Retest Reliability of Grip-strength Measures Obtained over a 12-week Interval from Community-dwelling Elders. J Hand Ther 2005;18:426–8. https://doi.org/10.1197/j.jht.2005.07.003.
[51] Harris C, Wattles AP, DeBeliso M, Sevene-Adams PG, Berning JM, Adams KJ. The Seated Medicine Ball Throw as a Test of Upper Body Power in Older Adults. J Strength Cond Res 2011;25:2344–8. https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ecd27b.
[52] Delignières D, Perez S. Le plaisir perçu dans la pratique des APS : élaboration d'un outil d'évaluation. Rev STAPS 1998;45:7–18.
[53] Kendzierski D, DeCarlo KJ. Physical Activity Enjoyment Scale: Two Validation Studies. J Sport Exerc Psychol 1991;13:50–64. https://doi.org/10.1123/jsep.13.1.50.
[54] Borg GAV. Psychophysical bases of perceived exertion: Med Sci Sports Exerc 1982;14:377–81. https://doi.org/10.1249/00005768-198205000-00012.

[55] Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, McDonald A, Russi GD. Longitudinal Modeling of the Relationship between Age and Maximal Heart Rate. Med Sci Sports Exerc 2007;39:822–9. https://doi.org/10.1097/mss.0b013e31803349c6.
[56] Duff K. Evidence-Based Indicators of Neuropsychological Change in the Individual Patient: Relevant Concepts and Methods. Arch Clin Neuropsychol 2012;27:248–61. https://doi.org/10.1093/arclin/acr120.
[57] Erickson KI, Voss MW, Prakash RS, Basak C, Szabo A, Chaddock L, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. Proc Natl Acad Sci 2011;108:3017–22. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108.
[58] Dustman RE, Ruhling RO, Russell EM, Shearer DE, Bonekat WH, Shigeoka JW, et al. Aerobic Exercise Training and Improved Neuropsychological Function of Older Individuals. Neurobilogy Aging 1984;5:35–42. https://doi.org/10.1016/0197-4580(84)90083-6.
[59] Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, Banich MT, McAuley E, Harrison CR, et al. Ageing, fitness and neurocognitive function. Nature 1999;400:418–9. https://doi.org/10.1038/22682.
[60] Rikli RE, Edwards DJ. Effects of a Three-Year Exercise Program on Motor Function and Cognitive Processing Speed in Older Women. Res Q Exerc Sport 1991;62:61–7. https://doi.org/10.1080/02701367.1991.10607519.
[61] Hertzog C, Kramer AF, Wilson RS, Lindenberger U. Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? Psychol Sci Public Interest 2008;9:1–65. https://doi.org/10.1111/j.1539-6053.2009.01034.x.
[62] 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;2013:1–8. https://doi.org/10.1155/2013/657508.
[63] 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 Res Rev 2014;16:12–31. https://doi.org/10.1016/j.arr.2014.05.002.
[64] Cassilhas RC, Viana VAR, Grassmann V, Santos RT, Santos RF, Tufik S, et al. The Impact of Resistance Exercise on the Cognitive Function of the Elderly. Med Sci Sports Exerc 2007;39:1401–7. https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318060111f.
[65] Voelcker-Rehage C, Niemann C. Structural and functional brain changes related to different types of physical activity across the life span. Neurosci Biobehav Rev 2013;37:2268–95. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.028.
[66] Fissler P, Küster O, Schlee W, Kolassa I-T. Novelty Interventions to Enhance Broad Cognitive Abilities and Prevent Dementia. Prog Brain Res 2013;207:403–34. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00017-5.
[67] Basak C, Boot WR, Voss MW, Kramer AF. Can training in a real-time strategy video game attenuate cognitive decline in older adults? Psychol Aging 2008;23:765–77. https://doi.org/10.1037/a0013494.
[68] Green CS, Bavelier D. Action video game modifies visual selective attention. Nature 2003;423:534–7. https://doi.org/10.1038/nature01647.
[69] Achtman RL, Green CS, Bavelier D. Video games as a tool to train visual skills. Restor Neurol Neurosci 2008;26:435–46.
[70] Huang K-T. Exergaming Executive Functions: An Immersive Virtual Reality-Based Cognitive Training for Adults Aged 50 and Older. Cyberpsychology Behav Soc Netw 2020;23:143–9. https://doi.org/10.1089/cyber.2019.0269.
[71] Campo-Prieto P, Cancela JM, Rodríguez-Fuentes G. Immersive virtual reality as physical therapy in older adults: present or future (systematic review). Virtual Real 2021;25:801–17. https://doi.org/10.1007/s10055-020-00495-x.
[72] Bherer L, Gagnon C, Langeard A, Lussier M, Desjardins-Crépeau L, Berryman N, et al. Synergistic Effects of Cognitive Training and Physical Exercise on Dual-Task Performance in Older Adults. J Gerontol Ser B 2020;76:1533–41. https://doi.org/10.1093/geronb/gbaa124.
[73] Zhang R-Y, Chopin A, Shibata K, Lu Z-L, Jaeggi SM, Buschkuehl M, et al. Action video game play facilitates "learning to learn." Commun Biol 2021;4:1154. https://doi.org/10.1038/s42003-021-02652-7.

[74] Schaefer S, Schumacher V. The Interplay between Cognitive and Motor Functioning in Healthy Older Adults: Findings from Dual-Task Studies and Suggestions for Intervention. Gerontology 2011;57:239–46. https://doi.org/10.1159/000322197.
[75] Pacheco TBF, de Medeiros CSP, de Oliveira VHB, Vieira ER, de Cavalcanti FAC. Effectiveness of exergames for improving mobility and balance in older adults: a systematic review and meta-analysis. Syst Rev 2020;9:163. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01421-7.
[76] Anderson-Hanley C, Maloney M, Barcelos N, Striegnitz K, Kramer A. Neuropsychological Benefits of Neuro-Exergaming for Older Adults: A Pilot Study of an Interactive Physical and Cognitive Exercise System (iPACES). J Aging Phys Act 2017;25:73–83. https://doi.org/10.1123/japa.2015-0261.
[77] Taylor LM, Kerse N, Frakking T, Maddison R. Active Video Games for Improving Physical Performance Measures in Older People: A Meta-analysis. J Geriatr Phys Ther 2018;41:108–23. https://doi.org/10.1519/JPT.0000000000000078.
[78] Janhunen M, Karner V, Katajapuu N, Niiranen O, Jaakko I, Karvanen J, et al. Effectiveness of Exergame Intervention on Walking in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials 2021;101:pzab152. https://doi.org/10.1093/ptj/pzab152.
[79] Wang DXM, Yao J, Zirek Y, Reijnierse EM, Maier AB. Muscle mass, strength, and physical performance predicting activities of daily living: a meta-analysis. J Cachexia Sarcopenia Muscle 2020;11:3–25. https://doi.org/10.1002/jcsm.12502.
[80] Freed SA, Sprague BN, Stephan AT, Doyle CE, Tian J, Phillips CB, et al. Feasibility and Enjoyment of Exercise Video Games in Older Adults. Front Public Health 2021;9:751289. https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.751289.
[81] Graves LEF, Ridgers ND, Williams K, Stratton G, Atkinson G, Cable NT. The Physiological Cost and Enjoyment of Wii Fit in Adolescents, Young Adults, and Older Adults. J Phys Act Health 2010;7:393–401. https://doi.org/10.1123/jpah.7.3.393.

Figure Legends

Fig. 1. Legend text: *Neo One* device is equipped with a projector system and wall-mounted infrared sensors and is played without a head-mounted display or other equipment. Games are selected via a remote touch screen connected to a computer. Speakers are used to play the music.

Fig. 2. Legend text: I2WE: Immersive and interactive wall exergames; WMS: walking and strengthening.

Fig. 3. No legend text.

Tables

Table 1. Means of variables for I2WE and WMS groups

	I2WE (n = 19)		WMS (n = 15)		t	*p*
	M	SD	M	SD		
Age (years)	69.63	5.31	70.27	5.82	-0.33	.74
Years of education	12.89	3.91	13.87	3.72	-0.73	.47
BMI (m^2/kg)	25.09	3.67	26.40	4.12	-0.91	.37
Self-rated health (score)	3.68	0.58	3.40	0.63	1.36	.18
RHR (bpm)	59.31	3.92	59.33	6.04	-0.01	.99
HRR (bpm)	98.56	6.54	97.88	7.36	0.28	.78
MMSE (score)	28.95	1.08	28.80	1.01	0.41	.69
Physical activity (MET/week)	287.37	171.56	238.67	225.95	1.37	.18

Abbreviations: BMI = Body Mass Index; HRR = Heart Rate Reserve; I2WE = Immersive and Interactive Wall Exergames; M = Mean; METS = Metabolic Equivalent of Task; MMSE = Mini-Mental State Examination; RHR: Resting Heart Rate; SD = Standard Deviation; WMS = Walking and Muscle-Strengthening.

Table 2. Scores on cognitive and dual-task tests

	I2WE		WMS					ANOVA			
	Pre-test	*Post-test*	*Pre-test*	*Post-test*	*Mean difference*	*95% CI for Mean Difference**		*Main effect*		*Interaction effect*	
	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)		Lower	Upper	*p*	η^2	*p*	η^2
Zoo Map Test											
Plan formulation											
Total time (s)	214.10 (127.02)	205.13 (144.61)	202.34 (122.55)	196.01 (139.77)	-2.64	-86.83	81.56	.71	.00	.95	.00
Sequence score (n)	3.42 (3.27)	3.52 (8.19)	4.20 (3.49)	5.07 (3.28)	-0.76	-3.37	1.85	.45	.01	.56	.00
Plan execution											
Total time (s)	84.42 (51.07)	81.17 (28.30)	70.98 (38.86)	71.76 (41.90)	-4.02	-31.99	29.94	.86	.00	.77	.00
Sequence score (n)	7.10 (2.23)	6.89 (2.02)	7.67 (0.82)	7.73 (0.46)	-0.28	-1.04	0.49	.70	.00	.47	.00
Total score (n)	10.53 (4.41)	10.42 (3.79)	11.87 (3.58)	12.80 (3.34)	-1.04	-3.56	1.48	.51	.00	.41	.00
Spatial Span test											
Spatial span (n)	6.05 (1.18)	6.68 (1.12)	6.07 (0.88)	6.40 (1.06)	0.30	-0.48	1.08	**.02**	**.05**	.44	.00
Backward spatial span (n)	4.53 (1.58)	6.26 (1.66)	4.60 (2.03)	5.00 (1.36)	1.34	0.33	2.34	**<.001**	**.09**	**.01**	**.04**
Stroop test											
Board 1 (n)	68.79 (19.93)	68.58 (15.84)	63.60 (15.00)	65.80 (15.90)	-2.41	-11.22	6.40	.65	.00	.58	.00
Board 2 (n)	96.58 (26.04)	99.26 (19.99)	99.00 (18.78)	98.67 (18.09)	3.02	-5.41	11.45	.57	.00	.47	.00
Board 3 (n)	37.05 (16.09)	41.42 (14.18)	33.87 (10.53)	32.73 (12.37)	5.66	0.73	10.59	.17	.00	**.03**	**.01**
Interference score (n)	0.43 (0.13)	0.49 (0.11)	0.42 (0.09)	0.39 (0.11)	0.08	0.02	0.14	.28	.00	**.01**	**.03**
Mental Rotation test											
Score (n)	12.95 (4.43)	14.42 (5.39)	12.07 (5.19)	12.87 (4.94)	0.67	-2.44	3.79	.15	.01	.66	.00
Trail Making Test											
Time A (s)	36.12 (22.03)	35.93 (16.35)	37.94 (13.83)	40.72 (18.86)	-2.97	-12.54	6.60	.59	.00	.53	.00
Times B (s)	106.14 (87.75)	77.96 (38.83)	103.13 (72.68)	109.97 (70.09)	-35.02	-72.70	2.65	.26	.01	.07	.02
Time B-A (s)	70.02 (69.27)	42.03 (31.54)	65.19 (61.37)	69.25 (60.73)	-32.06	-65.93	1.82	.16	.01	.06	.02
Dual Task test											
TUG-dt (n) DT-ST	-0.79 (0.92)	-1.05 (1.22)	-0.93 (1.22)	-1.33 (1.17)	0.14	-0.96	1.23	0.23	.02	.80	.00
TUG-dt (time) DT - ST	2.80 (2.57)	1.17 (1.16)	1.71 (0.93)	1.44 (0.73)	-1.36	-2.71	-0.01	**0.01**	**.08**	**0.04**	**.04**

Bold values are significant. *95% CI for the mean difference in evolution (post-test – pre-test) between the two groups (I2WE, WMS).

Abbreviations: CI = Confidence Interval; Interaction effect = time*group effect; I2WE = Immersive and Interactive Wall Exergames; Main effect = time effect; M = Mean; n = numbers; SD = Standard Deviation; s = seconds; TUG-dt = Timed Up and Go Dual Task; WMS = Walking and Muscle Strengthening.

Table 3. Scores on physical tests

	I2WE					WMS					ANOVA	
	Pre-test	*Post-test*	*Mean difference*	*95% CI for Mean Difference*		*Pre-test*	*Post-test*	*Mean difference*	*95% CI for Mean Difference*		*Time effect*	
	M (SD)	M (SD)		Lower	Upper	M (SD)	M (SD)		Lower	Upper	*p*	η^2
Chair stand (number)	11.32 (2.43)	13.21 (3.15)	-1.89	-3.46	-0.33	10.20 (2.68)	11.13 (2.20)	-0.93	-2.70	0.83	**<.01**	**.06**
Handgrip left (kg)	24.21 (8.19)	25.63 (7.31)	-1.42	-3.27	0.44	22.95 (5.07)	23.25 (5.01)	-0.30	-2.39	1.79	.09	.00
Handgrip right (kg)	23.49 (7.85)	24.19 (7.63)	-0.70	-2.52	1.18	20.64 (3.77)	20.79 (4.11)	-0.15	-2.19	1.90	.39	.00
Chair-sit-and-reach left (cm)	3.10 (11.35)	-2.63 (8.19)	5.74	2.36	9.12	-1.67 (8.63)	-4.60 (10.51)	2.93	-0.87	11.38	**<.001**	**.05**
Chair-sit-and-reach right (cm)	3.95 (11.06)	-1.26 (9.24)	5.21	2.46	7.96	-1.36 (8.84)	-4.64 (10.35)	3.29	0.08	6.49	**<.001**	**.04**
Timed up and go (s)	5.84 (1.70)	5.44 (1.72)	0.41	-0.05	0.87	5.78 (0.97)	5.39 (0.85)	0.39	-0.13	0.91	**<.01**	**.02**
Back scratch right (cm)	7.68 (12.20)	4.00 (9.76)	3.68	-0.29	7.66	7.00 (13.57)	3.20 (11.57)	3.80	-0.67	8.27	**<.001**	**.03**
Back scratch left (cm)	13.13 (13.26)	8.68 (11.54)	4.58	1.70	7.46	10.13 (13.21)	8.27 (13.44)	1.87	-1.37	5.10	**<.001**	**.02**
Seated Medicine Ball Throw (cm)	261.84 (67.47)	272.32 (65.60)	-10.47	-26.07	5.12	239.27 (41.75)	239.00 (43.48)	0.27	-17.29	17.82	.23	.00
6WT Distance (m)	551.45 (111.17)	588.16 (128.80)	-36.71	-76.86	3.44	525.00 (91.72)	559.00 (88.01)	-34.00	-79.19	11.19	**<.01**	**.03**
6WT Intensity (% HRR)	0.52 (0.14)	0.53 (0.15)	-0.01	-0.09	0.06	0.48 (0.14)	0.51 (0.14)	-0.03	-0.12	0.15	.29	.01

Bold values are significant.

Abbreviations: CI = Confidence Interval; HRR = Heart Rate Reserve; I2WE = Immersive and Interactive Wall Exergames; M = Mean; SD = Standard Deviation; WMS = Walking and Muscle-Strengthening; 6WT = 6-minutes Walking Test.

Table 4. Objective and subjective intensities

	I2WE		WMS			
	M	SD	M	SD	t	p
Mean HR (bpm)	105.42	14.13	102.08	13.02	.71	.48
Peak HR (bpm)	127.21	16.94	125.33	16.20	.33	.75
Mean intensity (% HRR)	46.97	12.55	43.90	11.32	.74	.46
Peak intensity (% HRR)	69.01	15.16	67.83	14.60	.23	.82
Mean modified Borg (number)	4.75	0.89	4.59	0.69	.58	.57

Abbreviations: HR = Heart Rate; HRR = Heart Rate Reserve; I2WE = Immersive and Interactive Wall Exergames; M = Mean; SD = Standard Deviation; WMS = Walking and Muscle-Strengthening

Figure 1. *Neo One device*

Figure 2. *Study workflow*

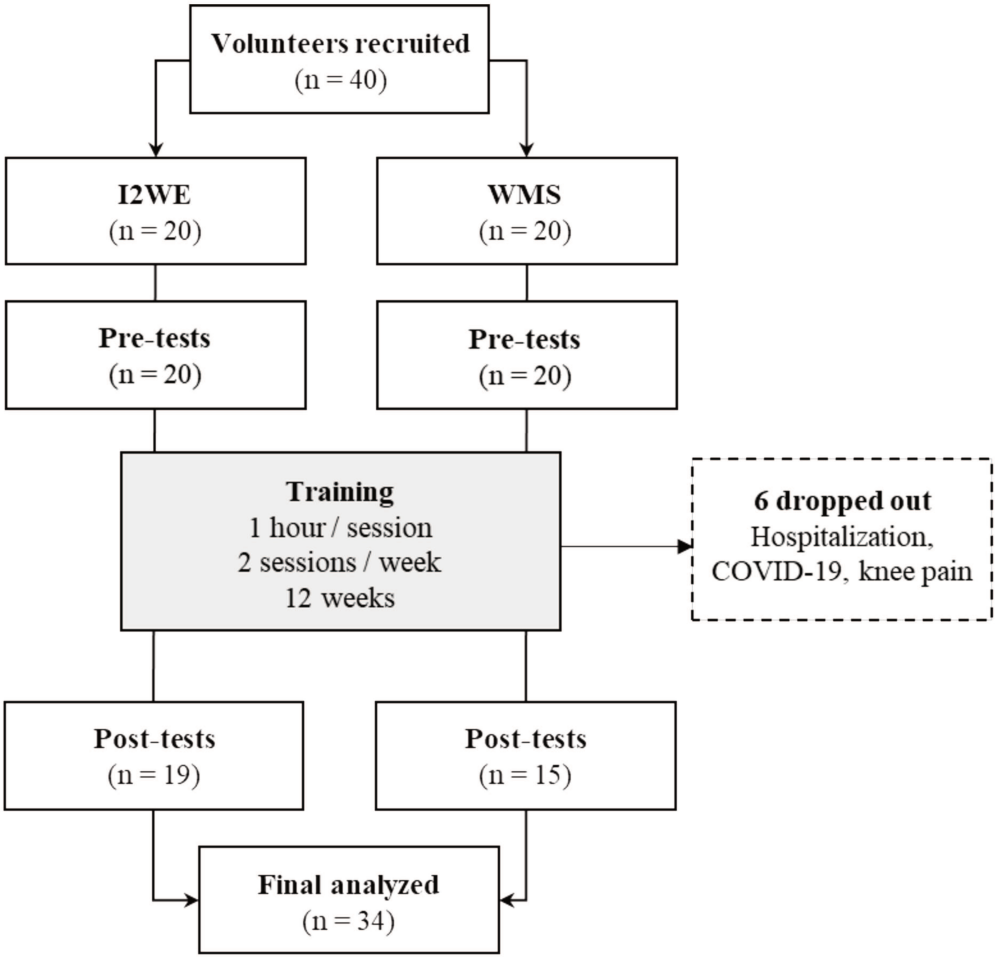
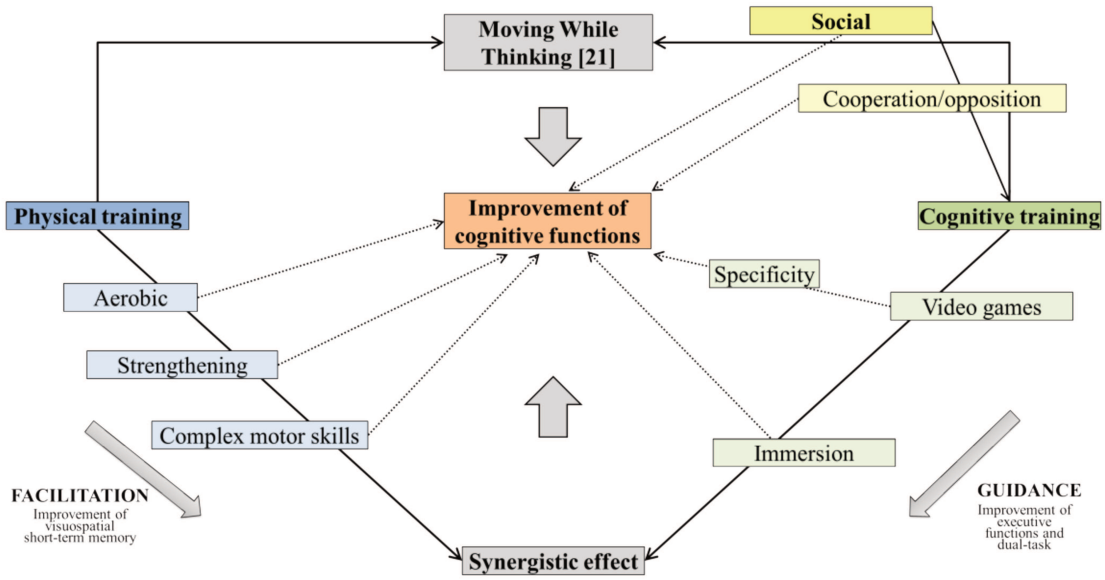


Figure 3. *Multidimensional mechanisms from I2WE to explain cognitive improvement*



Annexe 4. Article relatif à l'étude 1 publié dans Behavioral Sciences

behavioral sciences

MDPI

Article

Wireless Lighting System: A New Tool for Assessing Cognitive Functions in the Elderly

Néva Béraud-Peigné [1,2,3,*], Alexandra Perrot [1,2] and Pauline Maillot [3]

[1] Complexité, Innovation, Activités Motrices et Sportives, University of Paris Saclay, 91440 Bures-sur-Yvette, France; alexandra.perrot@universite-paris-saclay.fr
[2] Complexité, Innovation, Activités Motrices et Sportives, University of Orleans, 45062 Orleans, France
[3] Institut des Sciences du Sport-Santé de Paris, University Paris-Cité, 75015 Paris, France; pauline.maillot@u-paris.fr
* Correspondence: neva.beraud-peigne@universite-paris-saclay.fr

Abstract: Studies on the effects of aging on cognition have been using the same cognitive tests for decades. A Wireless Lighting System (WLS) could be used to assess cognitive functions in a physically active situation, making the assessment of cognition less isolated and more ecological. This pilot study aimed to evaluate the potential of a WLS for assessing older adults' cognitive functions. It was set up with 15 young (M = 23.47 years old) and 18 older adults (M = 71.44 years old). Their performances were recorded on three WLS tests, designed with the *Witty SEM* system to assess four main cognitive functions (i.e., inhibition, flexibility, visuospatial short-term and working memory), as well as on three traditional (TRAD) tests (Spatial Span Test, Stroop Test, Trail Making Test). The results show a significant difference between the YOUNG and OLD groups on all WLS test measures (except for WLS flexibility), as well as on all TRAD measures. Additionally, for the OLD group, there were significant correlations between WLS and TRAD test results ($r = -0.49$ for two measures of inhibition to $r = -0.80$ for two other measures of inhibition), except for visuospatial short-term memory. However, there was no significant correlation for the YOUNG group ($\rho = -0.27$ for inhibition to $r = 0.45$ for visuospatial short-term memory). These WLS tests were valid for assessing the cognitive functions (i.e., flexibility, visuospatial short-term and working memory, inhibition) of older adults and were sensitive to aging.

Keywords: executive functions; older adults; motor capacity; dual task; validity; test

check for updates

Citation: Béraud-Peigné, N.; Perrot, A.; Maillot, P. Wireless Lighting System: A New Tool for Assessing Cognitive Functions in the Elderly. *Behav. Sci.* **2023**, *13*, 943. https://doi.org/10.3390/bs13110943

Academic Editor: Stephanie C. DeLuca

Received: 28 September 2023
Revised: 10 November 2023
Accepted: 14 November 2023
Published: 17 November 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The increasing population of older people implies new challenges for society, such as keeping older adults healthy and active for longer. Preventing and/or reducing the risk of physical and cognitive impairment is one of the top public health priorities [1]. Researchers develop new modes of intervention (e.g., cognitive–motor training, multi-domain training), notably with new technologies (e.g., exergames [2], connected bikes [3], video games [4]), to provide optimal cognitive and physical benefits in older adults and also create positive experiences and pleasure. The question of how to evaluate these preventive programs is crucial for knowing their precise effects and being able to perfect them. Additionally, it is essential to develop tests closer to life's daily demands, so as to identify the level of transfer effect.

Many studies on the effects of aging on cognition have been using the same cognitive pencil and paper tests for decades. For example, the *Trail Making Test* [5], the *Stroop Test* [6], or the *Spatial Span Test* [7] are the gold standard for assessing cognitive functions. Although these tests are validated, reliable, sensitive, and effective in highlighting the effects of programs on the elderly, they have some limitations. How the researcher explains, administers, and encourages may vary depending on the subject. Time measurements are also often used, but triggered and recorded by the experimenter with a simple stopwatch. This can create imprecise measurements. The questions are not randomly generated with

each administration, so opportunities for retesting are reduced. In conclusion, traditional tests may not be sensitive and accurate enough. This inadequacy may be one of the reasons why, currently, no systematic differences have been found between the various types of physical or cognitive intervention, with studies using traditional tests with an interventional design (pre-tests—training—post-tests) (for review, see [8]). Finally, researchers may regret the lack of ecological validity of these tests as they do not sufficiently reflect performances in daily life. The level of cognitive functions is closely linked to motor skills in everyday life, yet traditional tests isolate cognitive functions. Adding a motor dimension to these tests would be interesting, especially with the emergence of multi-domain training that solicits cognitive and motor functions. Therefore, developing new modes of evaluation of cognitive functions appears necessary, with sensitive and ecological measurements. Developing new technologies [9] could be the solution, as they would be more efficient at assessing an individual's abilities than their paper-and-pencil equivalents [9]. Response latencies with millisecond accuracy increase test sensitivity, making computerized tests valuable. The administration and scoring are also automated, enabling researchers to simultaneously collect data, record, and report on many aspects of the performance. It is possible to automatically store and compare a person's performance between testing sessions. Consequently, the interpretation of results is more straightforward, accurate, and objective [10]. In addition to these points, administrators' testing biases are limited thanks to the standardization of test administration [11]. Lastly, tests can adapt to the examinee's level of performance to cover a wide range of cognitive abilities and minimize floor and ceiling effects. However, their use with the elderly can be problematic because older people may have negative attitudes towards new technologies [12]. The test interface can appear intimidating and/or counterintuitive to older adults. The lack of familiarity with new technologies and the potential presence of technology anxiety could influence performance and willingness to undergo such testing in older adults. Moreover, since tests assisted by new technologies are still not widely used compared to traditional tests, the lack of normative data and psychometric standards should be noted [10]. Despite the proliferation of laboratory- and internet-based computerized cognitive assessment platforms and their many advantages, these systems are still not as widely used as many classic paper-and-pencil tests, particularly in the older adult population [9]. It is therefore necessary to develop a tool that combines the positive aspects of current new technology tests (e.g., sensitivity, accuracy, standardization) without creating attrition, especially with computer-based ones. Wireless Lighting Systems (WLSs), like *BlazePod*, *Fitlight*, or *Witty SEM* (Microgate), are a potential solution. They consist of multiple light systems programmed to light up in different colors. In addition to emitting different colors, the *Witty SEM* system can vary shapes (e.g., letters, numbers, icons). *Witty SEM* can be used as a start light, with or without a countdown, to manage timed starts, and as an agility test. For about ten years, it has mainly been used to assess the reactive agility of athletes, like handball players [13], table tennis players [14], or basketball players [15], or used as a training method [16]. However, *Witty SEM* can also be used to assess and train cognitive functions. Still, only some studies have used it to research the effect of aging on cognition. WLSs could be used to create tests that are (a) cognitive with motor stimulation, (b) ecological, and (c) sensitive.

- **Cognitive with motor stimulation**

What makes *Witty SEM* interesting is the ability to create a test that appeals to motor and cognitive skills. At the cognitive level, it is possible to choose various testing options with different shapes and colors and, therefore, multiple cognitive difficulties. At the physical level, the participants must perform a motor task (e.g., hitting the target as quickly as possible) to confirm cognitive processing (e.g., finding the right target to hit). These new cognitive tests with motor stimulation could be helpful in studies evaluating the effects of physical activity programs. Moreover, the original, colorful character, supported by technology, could suggest a gaming spirit, so *Witty SEM* could be useful for studies of cognitive training programs with video games or exergames.

- **Ecological value**

Motor and cognitive tasks would be combined to perform the tests, making them more ecological. Several noncognitive factors, including motor functioning, can influence the relationship between test performance and everyday performance [17]. Dual-task performance assessment is clinically important as it represents a real-life condition for performing daily activities, and can better describe the potential for adverse events such as falls [18,19]. Ecological tests, associating physical and cognitive aspects, could assess the cognitive impact on everyday tasks more realistically. In daily life, older adults often have to perform a physical task with a cognitive demand (e.g., making food, walking to the right place to avoid obstacles, reacting quickly).

- **Measurement sensitivity**

The central control is provided by a stopwatch thanks to a radio or a Bluetooth transmission system and records data in real-time. Response latencies with millisecond accuracy lead to greater potential test sensitivity, making *Witty SEM* a valuable tool.

Effective evaluation methods to reduce the risk of physical and cognitive impairment are crucial. WLSs, especially *Witty SEM*, could enable researchers to investigate changes that may not be detected using conventional methods, and to assess and follow cognitive changes in aging over the long term. This study's originality also lies in using this system to measure the effect of age compared with traditional cognitive tests.

The purpose of this pilot study was (1) to test whether cognitive tests designed with a WLS were sensitive to the effects of age on cognition in the same way as traditional tests and (2) to test the convergent validity of WLS tests. We hypothesize that the WLS tests will show differences in performance by age and that their scores will be highly correlated with those of traditional tests. To study this, we designed three tests to assess four main cognitive functions (inhibition, flexibility, visuospatial short-term memory, visuospatial working memory), and we used three of the most useful traditional tests (*Spatial Span Test*, *Stroop Test*, *Trail Making Test*).

2. Materials and Methods

2.1. Population

Recruitment of participants was conducted between October 2022 and January 2023. Potential participants were contacted via mail, flyers, and the Risc website (a CNRS service unit). A power analysis, using G*Power version 3.1.9.7, based on the primary statistical test planned for this study (*t*-test independent group) revealed that a sample size of 32 participants was needed ($\alpha = 0.05$; power = 0.80; effect size: d = 0.9). As a very high effect size was expected (i.e., d > 0.9 [20]) for differences between young and old, it was set on this value: d = 0.9. All participants met the following inclusion criteria: (a) engage in less than 2.5 h of physical activity per week, (b) score 3 or higher on a subjective health scale (1 = very poor to 5 = excellent), (c) have no major pathology, (d) have normal or corrected vision and hearing, (e) have no difficulty bending or using their shoulders, and (f) not play video games or exergames. The older adults group (OLD) participants should be over 60 years of age, and those of the young adults group (YOUNG) should be between 18 and 30 years of age. All gave their written informed consent and were not compensated for their participation.

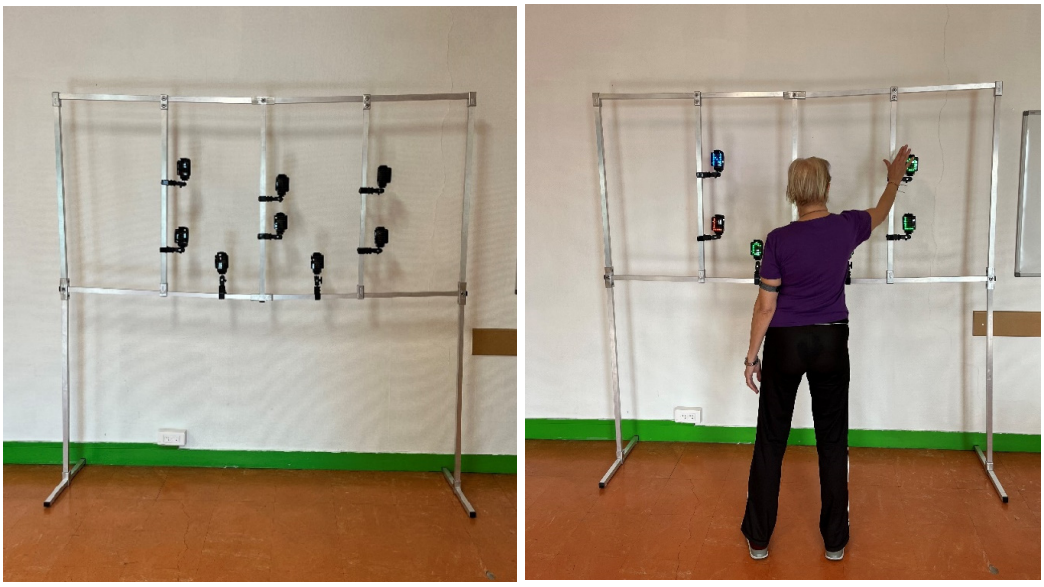
2.2. Outcomes

The tests were conducted individually for one hour in a quiet room in the University Paris-Cité (France) laboratory.

2.2.1. Wireless Lighting System (WLS) Cognitive Tests

The WLS tests were performed with *Witty SEM*, with a set of eight 5 cm × 7 cm semaphores equipped with an LED matrix—on which various colors and shapes can be displayed. Witty semaphores were placed individually (2 in the center and 6 in the

periphery) on a specially designed rack (Figure 1). The tests were initiated by a wireless control panel operated by radio transmission. The Witty Manager software enables the researchers to create new tests and record and save collected results. Three tests were designed. For each test, the participant stood in the middle of the rack, and at arm's length from the semaphores. They had to turn off the lights that appeared as fast as possible, using their dominant hand, without moving their feet, and returning their hand to the middle of their hips between each repetition. Witty semaphores include a motor sensor; it is thus necessary to approach it to turn it off. For each test, a trial with 5 examples was carried out.



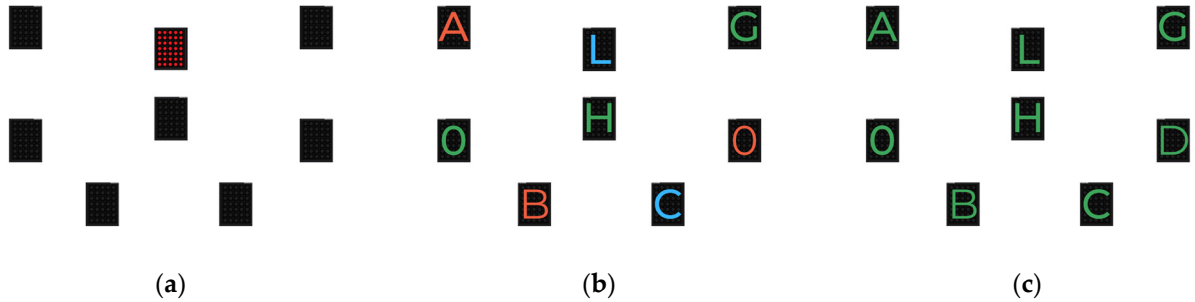
(**a**) (**b**)

Figure 1. (**a**) Specially designed rack; (**b**) participant taking the WLS inhibition test.

These tests, which combine physical and cognitive aspects, offer a less isolated cognition assessment. The standing position and the obligation to confirm cognitive processing with physical action contribute to providing an ecological assessment closer to the constraints of daily life (e.g., performing several tasks simultaneously, time pressure).

- **The WLS Inhibition Test.**

This test is separated into 3 parts. In the first part (Figure 2a), *Reaction Time (RT)*, the participant had to turn off the semaphores that randomly lit up red as fast as possible. The others remained unlit. In the second part (Figure 2b), *Reaction Time with Simple Inhibition (SI)*, the participant had to turn off the randomly lit semaphores with the green letter O as fast as possible. The others lit up with other colors (i.e., blue, red) associated with a letter (i.e., A, B, C, D, E, F, G, H). In the last part (Figure 2c), *Reaction Time with Complex Inhibition (CI)*, the participant had to turn off the randomly lit semaphores with the green letter O as fast as possible. The others lit up in green, associated with another letter (i.e., A, B, C, D, E, F, G, H). Each part consisted of 20 trials; each trial started 1500 ms after the previous response. The total time to complete each part was recorded in milliseconds. Inhibition was highlighted by analyzing the time difference in the CI–RT result.

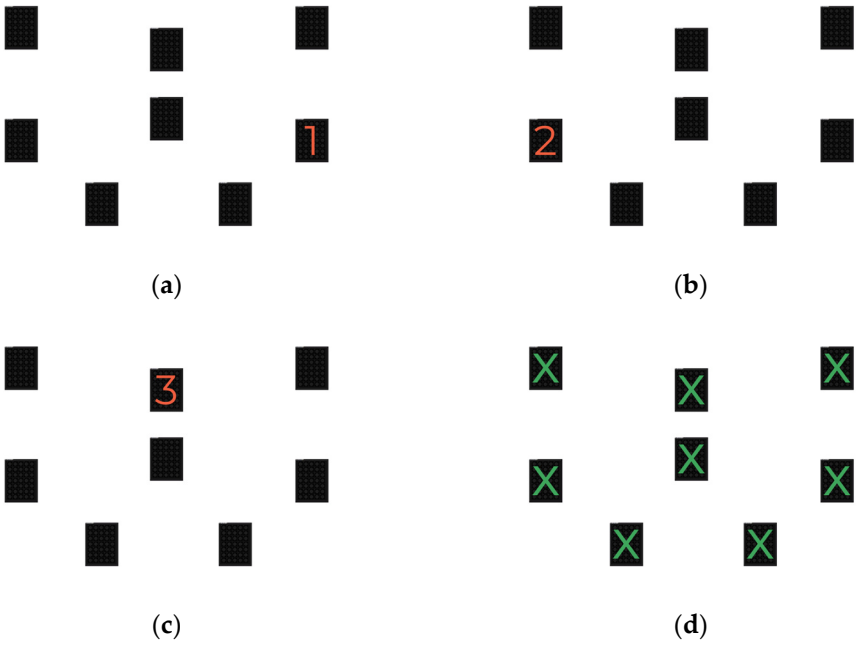


(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 2. WLS inhibition tests: (**a**) part 1: Reaction Time; (**b**) Part 2: Reaction Time with Simple Inhibition; (**c**) part 3: Reaction Time with Complex Inhibition.

- **The WLS Spatial Span Test.**

In the first part, which assesses visuospatial short-term memory, an ascending numerical sequence (e.g., 1, 2, 3, 4) was displayed thanks to the semaphores that lit up one after the other at the rate of one per second (Figure 3a–c). When all semaphores showed a green dot (Figure 3d) at the end of the sequence, the participant had to indicate the sequence of the numbers in the same order. In the second part, which assesses visuospatial working memory, a descending numerical sequence (e.g., 4, 3, 2, 1) was displayed thanks to the semaphores that lit up one after the other, at the rate of one per second. When the semaphores showed a green dot at the end of the sequence, the participant had to indicate the sequence of the numbers in the reverse order. For each part, the tests started with a sequence of 2 numbers. An additional number was added to the series for every two successful attempts. One point was awarded for each successful attempt, with 10 attempts.



(**a**) (**b**) (**c**) (**d**)

Figure 3. WLS Spatial Span Test: (**a**–**c**) part 1; (**d**) part 2.

- **The WLS Flexibility Test.**

Two semaphores (A and B), either those where the "circle with a horizontal line" or "the circle with a vertical line" symbols appeared, were placed near each other in the middle of the frame. The other semaphores were placed in a circle around the central ones to create "sectors" where the peripheral stimulus symbol would be recognized. The test was divided into 2 parts:

On the central semaphores A and B, the participant was shown a symbol—which was the same for both semaphores—corresponding to two icons ("circle with a horizontal line" or "the circle with a vertical line"). The participant had to remember this symbol. In addition, a symbol appeared (a blue cross) on one of the other peripheral semaphores, while other symbols appeared (a blue circle) on the other peripheral semaphores (Figure 4a). The participant had to remember the location of the cross. All information remained displayed for 1.995 s.

(**a**) (**b**)

Figure 4. WLS flexibility test: (**a**) part 1; (**b**) part 2.

Once all the lights were off, the central semaphores offered two options: a circle with a horizontal line or a circle with a vertical line. The participant had to hit the correct initial symbol and the target on the peripherical semaphores where the blue cross was.

One point was awarded for each successful attempt, with 10 attempts.

2.2.2. Traditional Cognitive Tests

- **The Spatial Span Test**

This is a subtest of the Wechsler Memory Scale [7]. The first part assesses visuospatial short-term memory. The participant had to reproduce a sequence of cubes designated by the examiner in the same order. In the second part, which evaluates visuospatial working memory, the participants reproduced a sequence of movements in reverse order. The number of cubes progressively increased, determining the *spatial span* and the *backward spatial span*. For each level, the participants completed 2 trials, scoring 1 point for each successful attempt. The test ended when two errors were made at the same level.

- **The Stroop Test** [6]

The Stroop Test was used to assess inhibition. Each board contained 100 items divided into 10 columns. Only the first 3 boards of the 4 were kept: the *naming condition* contained colored rectangles (color board); the *reading condition*, with color words appearing in black ink (word board); and the *interference condition* contained color words, appearing in color different from their meaning (color-word board). In all conditions, the performance measure was the number of correct responses in 45 s. The interference score was calculated as follows:

Interference score = color-word board score/(mean of color board and word board scores).

- **The Trail Making Test (TMT)** [5]

The TMT measures cognitive flexibility. Part A consisted of linking a series of increasing numbers from 1 to 25 by selecting the appropriate digit. In part B, the participant connected 2 series of symbols in alternation: 1 of numbers and 1 of letters. This had to be completed as quickly as possible without lifting the pen from the paper. If mistakes were made, the examiner informed the participant, who had to correct them. Flexibility was highlighted by the time difference in result B-A, a purer measure of flexibility.

2.3. Data Analysis

The analyses were performed using JASP software. Descriptive data (i.e., mean, standard deviation, range) were reported for all variables. Before conducting the inferential statistical tests, all relevant assumptions were checked (normal distribution, homogeneity of variance of independent variables). The results are provided at The results are provided in Tables S1 and S2, https://osf.io/s4k8u/ (accessed on 13 November 2023). Parametric tests were used—if relevant assumptions were met—and nonparametric tests were employed if relevant assumptions were not met. Mann–Whitney tests analyzed differences between groups. To determine the relationships between tests, Spearman's or Pearson's correlation coefficients were used. All statistical analyses with a p-value < 0.05 were considered significant. Effects sizes, rank-biserial correlation (r) for Mann–Whitney U-test, and Spearman's rho (ρ) for Spearman's correlation or Pearson's r were calculated to study the power of the results. As indicated in the effect size guidelines from Cohen [20], r and ρ are considered low if the effect size is between 0.10 and 0.30, medium if it is between 0.30 and 0.50, and large if it is superior to 0.50.

3. Results

3.1. Participants

Thirty-three subjects participated in the study: 15 young adults (9 women) and 18 older adults (12 women). Individual variables (i.e., age, BMI, height, subjective health) are given in Table 1. There was no statistical difference ($p > 0.05$) between YOUNG and OLD for height.

Table 1. Means of age, BMI, height, and subjective health for YOUNG and OLD groups.

	YOUNG		OLD	
	M	**SD**	**M**	**SD**
Age (*n*)	23.47	2.13	71.44	5.40
BMI (m^2/kg)	21.14	3.13	24.71	2.92
Height (cm)	169.00	10.04	165.67	10.47
Subjective health [1] (*n*)	4.27	0.46	3.83	0.51

Abbreviations: BMI = Body Mass Index; cm = centimeter, M = mean; *n* = number; SD = standard deviation. [1] Scoring: 1 = very poor, 2 = poor, 3 = good, 4 = good, 5 = excellent.

The scores for the WLS and traditional (TRAD) tests for YOUNG and OLD groups are presented in Table 2. There was a ceiling effect on WLS flexibility tests for the YOUNG group. The ranges for all the other tests were sufficient, with no sign of a floor or ceiling effect.

Table 2. Differences in TRAD and WLS tests between YOUNG and OLD.

	YOUNG M (SD)	Range	OLD M (SD)	Range	*W*	*p*	*r*
WLS tests							
WLS Inhibition							
Reaction time (s)	38.54 (1.02)	37.08–40.53	41.06 (2.31)	36.82–47.63	234.00	<0.001	0.73
Simple inhibition (s)	49.89 (3.27)	45.03–58.24	57.08 (6.71)	46.32–67.54	217.00	<0.01	0.61
Complex inhibition (s)	56.50 (5.18)	50.51–66.18	64.75 (6.76)	52.93–74.75	224.00	<0.001	0.66
Inhibition score (s)	17.96 (4.77)	13.13–26.37	23.69 (6.00)	13.67–32.47	213.00	<0.01	0.58
WLS Spatial Span Test							
Visuospatial short-term memory (n)	8.60 (1.12)	7–10	7.28 (0.89)	6–9	54.00	<0.01	0.60
Visuospatial working memory (n)	8.20 (0.94)	6–9	6.61 (0.85)	5–8	32.50	<0.001	0.76
WLS Flexibility							
Flexibility (n)	10.00 (0.00)	10–10	7.11 (3.16)	0–10	-	-	-

Table 2. *Cont.*

	YOUNG M (SD)	Range	OLD M (SD)	Range	*W*	*p*	*r*
TRAD tests							
Spatial Span Test							
Spatial span (n)	8.47 (1.96)	5–12	6.39 (1.42)	4–9	54.50	<0.01	0.60
Backward spatial span (n)	8.47 (2.10)	5–12	5.56 (1.85)	3–8	43.00	<0.001	0.68
Stroop							
Color board (n)	122.00 (17.30)	95–152	106.00 (22.76)	63–160	61.50	<0.05	0.52
Word board (n)	83.57 (13.96)	60–113	71.89 (25.18)	33–150	70.50	<0.05	0.44
Color-word board (n)	63.86 (13.94)	40–98	45.94 (27.03)	18–139	38.50	<0.001	0.69
Interference score (n)	0.62 (0.14)	0.47–1.03	0.50 (0.17)	0.24–1.02	49.00	<0.01	0.61
TMT							
Time A (s)	14.15 (4.09)	10.33–24.33	31.78 (13.98)	15.01–62.06	255.00	<0.001	0.89
Time B (s)	33.32 (9.57)	21.05–24.75	93.04 (62.95)	32.73–227.99	245.00	<0.001	0.81
Time B–Time A (s)	19.16 (9.09)	0.73–35.57	61.27 (51.94)	14.91–167.90	212.00	<0.01	0.57

Abbreviations: M = mean; n = number; SD = standard deviation; s = second; TMT = Trail Making Test; TRAD = traditional; WLS = Wireless Lighting System.

3.2. The Ability of the Tests to Detect the Effects of Aging

The first step of data analysis involved examining the ability of the WLS tests to discriminate between the YOUNG and OLD groups. The results for the group effect on the WLS and TRAD tests for the YOUNG and OLD groups are given in Table 2. There was a significant difference between the YOUNG and OLD groups on all six WLS test measures ($p < 0.01$ or $p < 0.001$) with large effect sizes ($r > 0.50$), and all TRAD measures with medium to large effect sizes. Statistical analysis could not be performed for the flexibility of the WLS tests because the variance was equal to 0 for the YOUNG group.

3.3. Convergent Validity

In the second step of data analysis, the convergent validity of the tests was assessed by calculating correlations between the WLS and the TRAD tests separately for the YOUNG and OLD groups (Table 3). For the OLD group, there was a high correlation between two measures of inhibition, *Complex Inhibition (WLS)* and *color-word board (TRAD)* ($r = -0.73$, 95% CI = −0.89; −0.41, $p < 0.001$) and a moderate correlation between the two others, *inhibition score (WLS)* and *interference score (TRAD)* ($r = -0.49$, 95% CI = −0.78; −0.03, $p < 0.05$). There were high correlations between the two measures of flexibility, the *flexibility test (WLS)* and *Time B–Time A (TRAD)* ($\rho = -0.63$, 95% CI = −0.85; −0.24, $p < 0.01$) and between the two measures of working visuospatial memory, the *visuospatial working memory (WLS)* and *backward spatial span (TRAD)* ($r = 0.67$, 95% CI = 0.29; 0.86, $p < 0.01$). There was no correlation between the two measures of visuospatial short-term memory, the *visuospatial short-term memory (WLS)* and *spatial span (TRAD)* ($p > 0.05$).

For the YOUNG group, there was no correlation between measures ($p > 0.05$). Statistical analysis could not be performed for the flexibility test results because the variance was equal to 0.

Table 3. Convergent validity between TRAD and WLS tests.

TRAD \ WLS		Complex Inhibition		Inhibition Score		Flexibility		Visuospatial Short-Term Memory		Visuospatial Working Memory	
		YOUNG	OLD	YOUNG	OLD	YOUNG	OLD	YOUNG	OLD	YOUNG	OLD
Color-word board	*r*/ρ	−0.41	**−0.73**								
	95% CI	−0.77–0.16	**−0.89–−0.41**								
	p	0.14	**<0.001**								
Interference score	*r*/ρ			−0.27	**−0.49**						
	95% CI			−0.70–−0.30	**−0.78–−0.03**						
	p			0.34	**0.04**						
Time B-A	*r*/ρ					X	**−0.63**				
	95% CI					X	**−0.85–−0.24**				
	p					X	**0.005**				
Spatial span	*r*/ρ							0.45	0.05		
	95% CI							−0.08–0.78	−0.43–0.50		
	p							0.09	0.84		
Backward spatial span	*r*/ρ									0.46	**0.67**
	95% CI									−0.07–0.78	**0.29–0.86**
	p									0.09	**0.002**

Abbreviations: TRAD = traditional; WLS = Wireless Lighting System; X = statistical analysis could not be performed; 95% CI = 95% confidence interval. Bold values are significant.

4. Discussion

While much research is being conducted to find optimal strategies for improving senior citizens' physical and cognitive health, assessment methods remain conventional. It is necessary to develop new tests that are more ecological and precise than the old ones.

The first aim of this pilot study was to check whether cognitive tests designed with a WLS were sensitive to the effects of age in the same way as traditional tests. WLS tests enable researchers to see significant differences between young and older adults on several cognitive functions (i.e., inhibition, visuospatial short-term and working memory) with high effect sizes. As is the case in the literature, significant differences in performance were also found between YOUNG and OLD on traditional cognitive tests [21–23]. Statistical analysis could not be performed for the WLS flexibility test scores because of the ceiling effect of the YOUNG group. This may be caused by the fact that performance is recorded with a score rather than a time. Indeed, in this experiment, to compare the WLS test scores to their traditional equivalents, the WLS tests were programmed to be nonadaptive to the individual's abilities. If this tool were used to assess cognitive functions in young adults, the tests would have to be adaptive or initially more complicated.

The second aim of this study was to investigate the convergent validity of the WLS tests, assessed by examining whether the tests measured the desired cognitive functions. For the OLD group, the correlations were moderate to high for four cognitive functions, except for visuospatial short-term memory. Confidence intervals of 95% were large (up to 0.75 for correlations between interference score and inhibition score). Therefore, it would be necessary to have a larger sample to be able to reduce the 95% CI. WLS makes substantially assessing the desired functions possible and may reveal the daily living abilities of older adults more than traditional tests. Nevertheless, as Zygouris and Tsolaki's review [10] indicated, it should be noted that equivalence between paper-and-pencil tests and their computerized adaptations cannot be taken for granted, as differences in instructions, stimulus presentation, and response methods can affect test results in older adults and even the cognitive domains and processes they actually measure. Here, the difference lies mainly in that motor realization to perform the cognitive task was essential to pass these tests. This may explain why some of the variance in the new tests was not defined by the variance in the traditional tests. Moreover, traditional tests, which can be criticized for their lack of sensitivity and accuracy, were still used to investigate convergent validity. As the WLS tests would not present these negative aspects, this also justifies why not all the

variance was explained. Currently, traditional tests are the gold standard, and the most widely recognized tests for cognitive assessment, with standards for older adults.

For the YOUNG group, no correlation between measures was found. The tests were perhaps too easy for the young and did not successfully assess the desired cognitive functions. With young people, there should be more semaphores, stimuli should appear more quickly, and motor and cognitive difficulties should be amplified. Knowing that the performances of motor and cognitive functions are highly linked in the elderly [24], it is necessary to develop tests that are closer to the challenges of everyday life, rather than only an isolated cognitive task. Since traditional tests lack ecological validity, this makes WLS tests a promising alternative. Ecological validity is "the degree to which test performance corresponds to real-world performance" [17]. Therefore, these new tests should not be considered as equivalents to traditional tests but as ecological tests, combining physical stimulation with cognitive assessment (e.g., hitting the right target as quickly as possible). Even if the Witty SEM configurations do not directly mimic situations in actual daily life, the additional motor aspect makes the assessment of cognition less isolated and, therefore, closer to the multidimensional demands of daily life. The ecological value, in particular the verisimilitude (i.e., the similarity of the test to everyday tasks [25]) of the test, could be enhanced by adding more complex physical tasks, such as walking or balance situations. Increasing verisimilitude would allow tests to better capture the essence of everyday cognitive skills [17]. Moreover, new tests could be developed with this tool, including dual-task and coordination tests, which are lacking.

The main limitation of this study is the inability to perform inferential statistics to test the differences between the two groups for the WLS flexibility test. It would be interesting to modify the test and make it scalable (e.g., increase the speed and difficulty) according to the participant's level. Moreover, the results were compared only for three cognitive tests. Other tests could be created to evaluate planning, attention, or long-term memory. It would be interesting to test a larger panel of the elderly population to obtain normative data and psychometric standards. The convergent validity of these tests has been proven for older adults. Now, reliability aspects need to be studied, particularly test–retest reliability and inter-rater reliability.

This first pilot study showed encouraging results, which must be confirmed by a more comprehensive study with a larger sample. WLS tests could be compared with other cognitive tests, particularly ecological tests, such as some BADS tests [26]. WLS tests appear to be valid in assessing cognitive functions (i.e., flexibility, visuospatial short-term and working memory, inhibition) in a physical situation for older adults, and are also sensitive to age effects. WLS tests can evaluate older adults' cognition, making the assessment of cognition less isolated and, therefore, more ecological. This could also align with the multimodal intervention programs emerging in the literature and offer more complete transfer effects with real life.

Author Contributions: Conceptualization, N.B.-P., A.P. and P.M.; methodology, N.B.-P., A.P. and P.M.; formal analysis, N.B.-P.; investigation, N.B.-P.; data curation, N.B.-P.; writing—original draft preparation, N.B.-P., A.P. and P.M.; writing—review and editing, N.B.-P., A.P. and P.M.; supervision, A.P. and P.M.; project administration, A.P. and P.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki. It is a preparatory study for a more extensive study approved by the Institutional Review Board (Research Ethics Committee of the University Paris-Saclay n°462, on 14 February 2023) and registered on ClinicalTrials.gov (NCT05991011).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study. Written informed consent was obtained from the patient(s) to publish this paper.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available in the Open Science Framework at https://osf.io/s4k8u/ (accessed on 15 November 2023).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Winblad, B.; Amouyel, P.; Andrieu, S.; Ballard, C.; Brayne, C.; Brodaty, H.; Cedazo-Minguez, A.; Dubois, B.; Edvardsson, D.; Feldman, H.; et al. Defeating Alzheimer's Disease and Other Dementias: A Priority for European Science and Society. *Lancet Neurol.* **2016**, *15*, 455–532. [CrossRef]
2. Béraud-Peigné, N.; Maillot, P.; Perrot, A. The Effects of a New Immersive Multidomain Training on Cognitive, Dual-Task and Physical Functions in Older Adults. *GeroScience* **2023**, 1–17. [CrossRef] [PubMed]
3. Barcelos, N.; Shah, N.; Cohen, K.; Hogan, M.J.; Mulkerrin, E.; Arciero, P.J.; Cohen, B.D.; Kramer, A.F.; Anderson-Hanley, C. Aerobic and Cognitive Exercise (ACE) Pilot Study for Older Adults: Executive Function Improves with Cognitive Challenge While Exergaming. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* **2015**, *21*, 768–779. [CrossRef]
4. Perrot, A.; Maillot, P.; Hartley, A. Cognitive Training Game Versus Action Videogame: Effects on Cognitive Functions in Older Adults. *Games Health J.* **2019**, *8*, 35–40. [CrossRef] [PubMed]
5. Reitan, R.M. *Manual for Administration and Scoring of the Halstead–Reitan of Neuropsychological Test Battery for Adults and Children*; Neuropsychology Press: Tucson, AZ, USA, 1979.
6. Stroop, J.R. Studies of Interference in Serial Verbal Reactions. *J. Exp. Psychol.* **1935**, *18*, 643–662. [CrossRef]
7. Wechsler, D. *WMS-III: Wechsler Memory Scale Administration and Scoring Manual*; Harcourt Brace&Co.: San Diego, CA, USA; The Psychological Corporation: San Antonio, TX, USA, 1997.
8. Guo, W.; Zang, M.; Klich, S.; Kawczyński, A.; Smoter, M.; Wang, B. Effect of Combined Physical and Cognitive Interventions on Executive Functions in Older Adults: A Meta-Analysis of Outcomes. *IJERPH* **2020**, *17*, 6166. [CrossRef]
9. Sternin, A.; Burns, A.; Owen, A.M. Thirty-Five Years of Computerized Cognitive Assessment of Aging—Where Are We Now? *Diagnostics* **2019**, *9*, 114. [CrossRef]
10. Zygouris, S.; Tsolaki, M. Computerized Cognitive Testing for Older Adults: A Review. *Am. J. Alzheimers Dis. Other Dement.* **2015**, *30*, 13–28. [CrossRef]
11. Wild, K.; Howieson, D.; Webbe, F.; Seelye, A.; Kaye, J. Status of Computerized Cognitive Testing in Aging: A Systematic Review. *Alzheimers Dement.* **2008**, *4*, 428–437. [CrossRef] [PubMed]
12. Broady, T.; Chan, A.; Caputi, P. Comparison of Older and Younger Adults' Attitudes towards and Abilities with Computers: Implications for Training and Learning. *Br. J. Educ. Technol.* **2010**, *41*, 473–485. [CrossRef]
13. Horníková, H.; Jeleň, M.; Zemková, E. Determinants of Reactive Agility in Tests with Different Demands on Sensory and Motor Components in Handball Players. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 6531. [CrossRef]
14. Horníková, H. Determinants of Reactive Agility Performance in Table Tennis Players. *Stud. Sport.* **2023**, *16*, 15–23. [CrossRef]
15. Gonzalo-Skok, O.; Serna, J.; Rhea, M.R.; Marín, P.J. Relationships between Functionnal Movement Tests and Performance Tests in Young Elite Male Basketball Players. *Int. J. Sports Phys. Ther.* **2015**, *10*, 628–638. [PubMed]
16. Horváth, D.; Négyesi, J.; Győri, T.; Szűcs, B.; Tóth, P.J.; Matics, Z.; Ökrös, C.; Sáfár, S.; Szabó, N.; Takács, B.; et al. Application of a Reactive Agility Training Program Using Light-Based Stimuli to Enhance the Physical and Cognitive Performance of Car Racing Drivers: A Randomized Controlled Trial. *Sports Med.-Open* **2022**, *8*, 113. [CrossRef] [PubMed]
17. Chaytor, N.; Schmitter-Edgecombe, M. The Ecological Validity of Neuropsychological Tests: A Review of the Literature on Everyday Cognitive Skills. *Neuropsychol. Rev.* **2003**, *13*, 181–197. [CrossRef] [PubMed]
18. Montero-Odasso, M.; Muir, S.W.; Speechley, M. Dual-Task Complexity Affects Gait in People with Mild Cognitive Impairment: The Interplay Between Gait Variability, Dual Tasking, and Risk of Falls. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* **2012**, *93*, 293–299. [CrossRef] [PubMed]
19. Kearney, F.C.; Harwood, R.H.; Gladman, J.R.; Lincoln, N.; Masud, T. The Relationship between Executive Function and Falls and Gait Abnormalities in Older Adults: A Systematic Review. *Dement. Geriatr. Cogn. Disord.* **2013**, *36*, 20–35. [CrossRef]
20. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences*; Lawrence Erlbaum Associates Inc.: Hillsdale, NJ, USA, 1988; Volume 56, p. 102.
21. Rowe, G.; Hasher, L.; Turcotte, J. Age Differences in Visuospatial Working Memory. *Psychol. Aging* **2008**, *23*, 79–84. [CrossRef]
22. Goul, W.R.; Brown, M. Effects of Age and Intelligence on Trail Making Test Performance and Validity. *Percept. Mot. Skills* **1970**, *30*, 319–326. [CrossRef]
23. Cohn, N.B.; Dustman, R.E.; Bradford, D.C. Age-Related Decrements in Stroop Color Test Performance. *J. Clin. Psychol.* **1984**, *40*, 1244–1250. [CrossRef]
24. Clouston, S.A.P.; Brewster, P.; Kuh, D.; Richards, M.; Cooper, R.; Hardy, R.; Rubin, M.S.; Hofer, S.M. The Dynamic Relationship Between Physical Function and Cognition in Longitudinal Aging Cohorts. *Epidemiol. Rev.* **2013**, *35*, 33–50. [CrossRef] [PubMed]

25. Franzen, M.D.; Tishelman, A.C.; Sharp, B.H.; Friedman, A.G. An Investigation of the Test-Retest Reliability of the Stroop Colorword Test across Two Intervals. *Arch. Clin. Neuropsychol.* **1987**, *2*, 265–272. [CrossRef] [PubMed]
26. Norris, G.; Tate, R.L. The Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome (BADS): Ecological, Concurrent and Construct Validity. *Neuropsychol. Rehabil.* **2000**, *10*, 33–45. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Annexe 5. Article relatif à l'étude 2 publié dans Experimental Aging Research

Understanding Age-Related Interference in Cognitive-Motor Dual-Task Performance: A Novel Approach

Néva Béraud-Peigné, Alexandra Perrot, François Maquestiaux, Pauline Maillot

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné, Alexandra Perrot, François Maquestiaux, Pauline Maillot. Understanding Age-Related Interference in Cognitive-Motor Dual-Task Performance: A Novel Approach. Experimental Aging Research, 2025, pp.1-17. 10.1080/0361073X.2025.2528580 . hal-05378691

HAL Id: hal-05378691

https://hal.science/view/index/docid/5420469

Submitted on 17 Dec 2025

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

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

Understanding Age-Related Interference in Cognitive-Motor Dual-Task Performance: A Novel Approach

Béraud-Peigné Néva[abc]*, Perrot Alexandra[ab], Maquestiaux François[def], Maillot Pauline[c]

[a]*CIAMS, Université Paris Saclay, Orsay, France;*
[b]*CIAMS, Université Paris Saclay, Orléans, France;*
[c]*I3SP, Université Paris-Cité, Paris, France;*
[d]*CRFDP, Université de Rouen Normandie, France;*
[e]*LINC, Université de Franche-Comté, Besançon, France;*
[f]*MSHE, Université de Franche-Comté, Besançon, France.*

*corresponding author : Béraud-Peigné Néva, neva.beraud-peigne@universite-paris-saclay.fr (present address), 06 58 93 64 50.

Authors contribution

NBP (data curation, formal analysis, investigation methodology, project administration, writing -original draft, writing – review and editing), AP (methodology, project administration, supervision, writing -original draft, writing – review and editing), FM (writing – review and editing), PM (methodology, project administration, supervision, writing -original draft, writing – review and editing).

Abstract

Objectives: Cognitive tasks in dual-task (DT) tests can be either driven mainly by the environmental demands (an ” environment-driven” mode of control) or guided mainly by the individual (a “self-generated” mode of control). Two new DT tests were conducted to determine the effect of cognitive task types (self-generated vs. environment-driven) on cognitive and motor interference in DT.

Methods: An exploratory study was conducted with 17 older adults (OLD) and 15 adults (YOUNG) who completed three single-task (ST) tests – motor, cognitive environment-driven, cognitive self-generated – and 2 DT tests. Cognitive and motor DT Effect (DTE) were calculated.

Results: The self-generated DTE was greater in the motor task than in cognitive tasks, especially for the OLD group. There was no difference for the environment-driven DTE. In the motor task, the self-generated task created more interference than the environment-driven task for all groups, but this was not the case for the cognitive task.

Conclusions: Some ideas were devised for creating interference-efficient tests, like using cognitive self-generated and motor complex tasks. The study confirmed previous results on gait tasks with new information on motor complex tasks.

Keywords: assessment, cognition, exercise, prevention

Introduction

Dual-task (DT) performance can be measured as the efficiency of two tasks that people attempt to perform simultaneously (Abernethy, 1988; Maquestiaux, 2012, 2017). These two tasks can be operated independently, measured separately, and have distinct goals (McIsaac et al., 2015). Assuming the existence of limited resources (e.g., Kahneman, 1973; Wickens, 1984) that are shared in DT situations, performances can suffer, even more so among older adults (e.g., Hartley & Little, 1999). Dual-Task Effect (DTE) occurs when the simultaneous performance of two tasks results in the deterioration of one or both task performances (Fallahtafti et al., 2021). The two tasks interfere with each other if they use similar functional and/or brain subsystems. According to Wickens et al. (1984), the more the tasks share similar brain systems, the more likely they are to interfere.

A specific kind of DTE, cognitive-motor interference, occurs when the DT paradigm pairs a motor task with a cognitive task. The characteristics of the motor task and the cognitive task could mediate interference (Al-Yahya et al., 2011). According to the content-dependent theory (Hazeltine et al., 2006; see also Maquestiaux et al., 2018), dual-task interference depends critically on the manner in which the tasks are represented in working memory. For instance, two tasks that rely on very distinct representations or "codes", such as an auditory-vocal task and a visual-manual task, are less susceptible to interfere with each other, compared to tasks that share very similar codes, such as two visual-manual tasks (Hazeltine et al., 2006). However, little is known about cognitive interference because many DT studies focus exclusively on performance changes in motor tasks. For example, most of the 66 studies of the meta-analysis of Al-Yahya et al. (2011) on cognitive–motor interference with walking did not measure single-task (ST) cognitive performance. Therefore, it does not allow for drawing conclusions, which reveals the importance of creating protocols that evaluate the two tasks. Moreover, the instruction given to process the two tasks simultaneously is fundamental. Some studies require

participants to prioritize one of the two tasks. For example, Verghese et al. (2007) asked older adults to prioritize the cognitive task at the expense of the task of walking. Prioritizing this only makes it possible to account for interference on one of the two tasks, giving no information about the strategy chosen by participants.

Given the aging of the global population, current studies focus on creating effective physical and/or cognitive training to improve older adults' health (e.g., Adcock et al., 2020; Rahe et al., 2015; Tsai et al., 2017). For a long time, researchers have focused on cognitive and physical functions. Nevertheless, several studies provided experimental evidence that older adults have more problems than younger persons performing two tasks concurrently (Bock, 2008; Hartley, 1992). Age-related physical changes are implicated in cognitive decline (e.g., Pellegrini-Laplagne et al., 2022), so studying DT enables researchers to better understand this relationship (e.g., Beauchet & Berrut, 2006). Moreover, daily life has many situations with simultaneous motor and cognitive tasks, which possibly threaten the quality of life of older adults. Adding DT testing to multifactorial assessments in interventional studies might assist with developing individually targeted interventions (Muir-Hunter & Wittwer, 2016) and concretely improve the daily lives of older adults. Therefore, assessing DT's capacities is a major issue.

In recent years, more interventional studies have begun to include DT tests (*e.g.,* Adcock et al., 2020; Béraud-Peigné et al., 2023; Falbo et al., 2016; Schoene et al., 2013; Theill et al., 2013), with different motor and cognitive tasks influencing the interference. Motor task complexity (*e.g.,* speed of execution, number of body segments used), environment, and novelty are essential characteristics since more resources must be invested as tasks become more difficult (Schaefer, 2014). Nevertheless, the motor tasks used are often walking, with either walking at preferred speed (e.g., Adcock et al., 2020; Falbo et al., 2016; Theill et al., 2013) or a Timed Up and Go test (e.g., Béraud-Peigné et al., 2023; Schoene et al., 2013).

At the cognitive level, there are two categories of tasks, according to their generation mode: a) self-generated tasks, produced by the subject and independent of context, and b) environment-driven tasks that are context-dependent and outside the person's control (Abernethy, 1988; Beauchet & Berrut, 2006; Ebersbach et al., 1995; Pashler, 1994; Treisman, 1969). Tasks that are self-generated, such as verbal fluency tasks (e.g., Schoene et al., 2013), counting tasks (e.g., Adcock et al., 2020; Béraud-Peigné et al., 2023; Theill et al., 2013) and random number generation tasks (e.g., Falbo et al., 2016), engage complex neural networks that connect various brain regions. These networks may overlap with some of those involved in gait control. In contrast, cognitive tasks that involve external (environment-driven) interfering factors share "stimulus-driven" lower-order networks with gait control networks. As a result, they cause less interference compared to the more complex, higher-order networks shared by conceptually driven tasks (Fuster, 2008). The results of Al-Yahya et al. (2011) further support this idea, suggesting that cognitive tasks with internal interfering factors (such as conceptually driven tasks) are more disruptive to gait performance than tasks involving external interfering factors. However, evidence is lacking about the effect of the generation mode of the cognitive task on motor and cognitive interference, especially with more complex motor tasks.

In the present study, we designed two DT tests with the same motor tasks and two different cognitive tasks that were either self-generated or environment-driven (within vs. outside the participant's control). The aim of the study was to determine the age-related effect of cognitive tasks (self-generated, environment-driven) on cognitive and motor DTE. As a prerequisite, we examined whether there was an age effect on the ST and DT tasks, and on DTE. We hypothesized that the ST and DT tasks, and DTE will show differences in performance by group. Al-Yahya et al. (2011) hypothesized that cognitive tasks involving internal interfering factors disturb gait performance more than those involving external

interfering factors. We predicted that the self-generated task, compared to the environment-driven task, would produce more interference in cognitive and motor performance in dual-task.

Materials and methods

Participants

The study was conducted according to the Helsinki Declaration guidelines, and is a preparatory study for a more extensive study approved by the Institutional Review Board (Research Ethics Committee of the University XX n°462, on 14 February 2023) and registered on ClinicalTrials.gov (NCT05991011). Potential participants were contacted via mail, flyers, and the Risc website (a CNRS service unit). Using G*Power version 3.1.9.7, a power analysis based on the statistical test planned for this study (2 × 2 within-between interaction ANOVA) revealed that a sample size of 30 participants was needed ($\alpha = 0.05$; power = 0.80; effect size: $\eta^2 = 0.07$). All participants met the following criteria: score 3 or higher on a subjective health scale (1 = very poor to 5 = excellent), no major pathology, engaging in less than 2 hours and 30 minutes of physical activity per week, and normal or corrected vision and hearing. The participants from the older adult group (OLD) were over 60 years of age, and those from the young adult group (YOUNG) were between 18 and 30. They all signed a written informed consent and participated on a voluntary basis. The participants were not compensated.

Thirty-two subjects participated in the study: 15 young adults (9 women) and 17 older adults (11 women). Individual variables (*i.e.,* age, BMI, height, subjective health) are given in Table 1.

Outcomes

The created DT tests followed the recommendations methodological criteria for designing DT studies, which indicates the necessity of measuring both main and concurrent task performance in ST and DT (Boisgontier et al., 2013). All ST and DT tests, described in

Figure 1, were performed each during one minute. They were conducted in a quiet room in the I3SP laboratory at XX.

Single Tasks (ST)

Three ST tests were performed: 1 motor test and 2 cognitive tests (modalities are described in Additional file 1).

Motor ST - STEP task. The participants had to go up and down on a STEP (15 centimeters in height) at a comfortable pace, putting their two feet alternately on top of the STEP and then alternately on the ground. The number of round trips was counted.

Cognitive environment-driven ST - sound counting task. The task was to count the number of high-pitched sounds integrated into an equiprobable stream of "high-pitched" and "low-pitched" sounds. The high sound was a tone of 1,800 Hz, and the low sound was a tone of 400 Hz. Following Chauvel et al (2012), the cadence of the sound presentation was 1,200 ms, and each sound had a duration of 15 ms. This stream of sounds was emitted via the E-Prime 2.0 software (Schneider et al., 2002). At the end of the listening session, participants were asked to give the number of high-pitched sounds heard. The performance measure was the difference between the actual number of beeps and the number the participant gave (cognitive environment-driven ST score).

Cognitive self-generated ST - reverse counting task. The aim was to count backward in steps of seven, beginning with 286 at the participant's pace. If the participant made a mistake, the examiner notified them, and the participant had to correct themselves. The number of correct answers (cognitive self-generated ST score) was recorded.

Dual Tasks (DT)

Two cognitive-motor DT tests were completed. There was no request for prioritization of one of the tasks, as this is the most common DT paradigm (involving walking) because of its more ecological nature (Beauchet & Berrut, 2006). This instruction made it possible to determine which personal strategy the participant chose (whether the participant preferred task 1 or task 2).

For the **environment-driven DT**, participants had to do *STEP* and *sound counting* tasks simultaneously. Performance on the motor task (motor environment-driven DT) and the cognitive task (cognitive environment-driven DT) were recorded.

For the **self-generated DT**, participants had to do *STEP* and *reverse counting* tasks simultaneously (the number of beginning was 565). Performance on the motor task (motor self-generated DT) and the cognitive task (cognitive self-generated DT) were both recorded. For this test, the participants were filmed to allow the scores to be transcribed afterward.

Dual Task Effect (DTE)

Dual Task Effect (DTE) is usually used to calculate the interaction of two tasks. The dual-task effect is bidirectional, expressing costs or benefits. The DTE is positively stated if the performance in DT is better than in ST, whereas the DTE is expressed negatively if the performance in DT is worse than in ST. Here is the calculation: DTE = $\frac{DT-ST}{MeanGroupST}$. DT and ST represent the individual scores of the participant, while $_{MeanGroup}ST$ represents the group average (YOUNG or OLD). This calculation allows for the normalization of dual-task performance relative to the group's mean performance in the single task, making comparisons between individuals more consistent.

By using both the DT and DTE results, we aimed to provide a complete picture of the effects of dual task, including both raw performance environment (DT) and the relative impact (DTE) of adding a second task. This distinction allowed for a clearer understanding of the underlying effects of dual-task interference or benefit across different tasks and groups.

Cognitive battery

Spatial Span Test. This subtest of the Wechsler Memory Scale (Wechsler, 1997), assessed visuospatial short-term memory and working memory. In the first part, the examiner designated a sequence of cubes, and the participant had to reproduce the sequence in the same order. In the second part, participants reproduced the sequence in reverse order. The number of cubes progressively increased, determining both the spatial span and the backward spatial span. At each level, participants completed two trials, earning one point per successful attempt. The test concluded when the participant made two consecutive errors at the same level.

Trail Making Test (Corrigan & Hinkeldey, 1987). It assessed cognitive flexibility and consisted of two parts. In part A, the participant connected a series of increasing numbers in the correct sequence. In part B, the participant alternated between connecting numbers and letters in the correct sequence. Participants had to complete the task as quickly as possible without lifting the pen from the paper. If an error occurred, the examiner pointed it out, and the participant had to correct it. Cognitive flexibility was assessed by calculating the time difference between Part B and Part A (B - A), providing a purer measure of flexibility.

Stroop Test (Stroop, 1935). It measured inhibitory control. It consisted of three conditions, each presented on a board with 100 items arranged in 10 columns. In the naming condition (color board), participants named the colors of rectangles. In the reading condition (word board), participants read color words printed in black ink. In the interference condition (color-word board), participants had to name the ink color of words that spelled out different colors

(e.g., the word "red" written in blue ink). For each condition, performance was measured by the number of correct responses within 45 seconds. The interference score was calculated as:

$$Interference\ score = \frac{Color-word\ board\ score}{mean\ of\ color\ board\ and\ word\ board\ scores}$$

Data analysis

The analyses were performed using JASP software (0.17.3 version). Descriptive data (*i.e.,* mean, standard deviation) were reported for all variables. To compare results on ST and DT tests and DTE between YOUNG and OLD groups, independent t-tests were used. For DTE, repeated mixed ANOVA measures were employed to test the interaction (1) between the generation mode of cognitive tasks (self-generated – reverse counting, environment-driven – sound counting) x age groups (YOUNG, OLD) and (2) between the nature of interference (cognitive DTE, motor DTE) x age groups (YOUNG, OLD). They were completed by 95% Confidence Intervals for mean difference. All statistical analyses with a p-value < 0.05 were considered significant. When a significant interaction was found, a Bonferroni Post Hoc test was performed, followed by a Student's t-test with Bonferroni correction for multiple comparisons.

Effect Sizes were calculated to study the power of the results: Eta-Squared (η^2) for ANOVA and Cohen's d (d) for t-test. As indicated in the effect size guidelines from Cohen (Cohen, 1988), η^2 is considered low if the effect size is between 0.01 and 0.06, medium if it is between 0.06 and 0.14, and large if it is superior to 0.14. Cohen's *d* is considered low if the effect size is between 0.20 and 0.50, medium between 0.50 and 0.80, and large if superior to 0.80.

Results

Cognitive and physical indicators

Cognitively, YOUNG group achieved higher scores across all tests, including Corsi - Visuospatial span ($t(30) = 3.49$, $p < .01$, $d = 1.24$, 95% CI= -3.35 – -0.88), Corsi – Backward visuospatial span ($t(30) = 4.15$, $p < .001$, $d = 1.47$, 95% CI= -4.38 – -1.49), Stroop – Inhibition score ($t(29) = 2.09$, $p < .05$, $d = 0.75$, 95% CI= -0.23 – 0.00) and Trail Making Test – Time B-A ($t(30) = 2.98$, $p < .01$, $d = 1.05$, 95% CI= 13.08 – 70.35).

Physically, the BMI was higher in the OLD group ($t(30) = 3.22$, $p < .01$, $d = 1.14$, 95% CI= -1.28 – 5.70). Descriptive data are presented in Table 1.

Results on ST and DT tests and DTE

The results of ST, and DT tests and DTE for both groups are given in Table 2 and Table 3.

Results on simple-task

Between the two groups on ST cognitive tests, there were significant differences. The YOUNG group performed better than the OLD group for cognitive sound counting ST ($t(30) = 2.11$, $p < .05$, $d = .75$, 95% CI= 0.09–5.83) and cognitive reverse counting ST ($t(30) = 2.33$, $p < .05$, $d = .82$, 95% CI= -17.80 – -1.16). However, there were no differences for motor ST ($t(30) = 0.35$, $p = .73$, $d = 0.12$, 95% CI= -3.51 – 2.49).

Results on dual-task

The YOUNG group outperformed the OLD group on all parameters. There was a significant difference for cognitive sound counting DT ($t(30) = 2.59$, $p < .05$, $d = 0.92$, 95% CI= 0.87–7.30), cognitive reverse counting DT ($t(30) = 2.28$, $p < .05$, $d = 0.81$, 95% CI= -16.48 – -0.93), motor sound counting DT ($t(30) = 2.36$, $p < .05$, $d = 0.84$, 95% CI= -5.82 – -0.42) and motor reverse counting DT ($t(30) = 3.01$, $p < .01$, $d = 1.07$, 95% CI= -8.05 – -1.55).

Dual Task Effects (DTE)

To understand prioritization and/or interference within groups between the two tasks during a DT, the performance operating characteristic was used (Fallahtafti et al., 2021). Two graphs were operated, one for the self-generated (reverse counting) DT (Figure 2a) and the other for the environment-driven (sound counting) DT (Figure 2b). The x-axis represents the motor performance (DTE_{motor}) calculated with the *STEP* test, and the y-axis is composed of the cognitive performance ($DTE_{cognitive}$) of the cognitive task (cognitive sound counting task or cognitive reverse counting task). The concurrent performance of a cognitive and motor task yields a different interference pattern. This includes four major changes (i.e., motor task facilitation, motor task interference, cognitive task facilitation, and cognitive task interference), the possible combinations of these observations, and no changes. Therefore, there are nine potential patterns of interferences (Plummer et al., 2013).

Reverse counting (self-generated) DTE. For reverse counting DT, as shown in Figure 2a, there was a mutual interference for the majority of participants (53,12%), with a homogeneous distribution for OLD (52.94%) and YOUNG groups (53.33%). Nearly all participants (93.75%) experienced interference on their motor task (100% OLD, 86.67% YOUNG). 40.62% of participants prioritized cognitive tasks at the expense of motor tasks (47.06% OLD, 33.33% YOUNG).

For motor reverse counting DTE, the YOUNG group achieved better results than the OLD group ($t(30) = 3.04$, $p < .01$, $d = 1.08$, 95% CI= -0.32 – -0.06). There was no significant difference for cognitive reverse counting DTE ($t(30) = 0.06$, $p = .95$, $d = 0.02$, 95% CI= -0.15 – 0.16).

Sound counting (environment-driven) DTE. As shown in Figure 2b, for sound counting DTE it was mainly the older adults who experience mutual interference (41.18% OLD, 6.67%

YOUNG). The motor task was facilitated for the majority of YOUNG group (66.67%), compared to only 17.65% among the OLD group.

For motor sound counting DTE, the YOUNG group achieved better results than the OLD group ($t(30) = 2.12$, $p < .05$, d = 0.75, 95% CI= -0.22 – 0.00). There was no significant difference for cognitive sound counting DTE ($t(30) = 0.10$, $p = 0.92$, d = 0.04, 95% CI= -1.14 – 1.26).

Differences between cognitive and motor DTEReverse counting (self-generated) task

The aim was to assess whether there were differences in motor and cognitive DTE when the cognitive task was self-generated. There was a significant task effect ($F(1, 30) = 16.96$, $p <.001$, $\eta^2 = .15$): both groups showed a difference between cognitive and motor DTE for reverse counting tasks (Additional file 2). There was also a significant interaction effect between the task and group ($F(1, 30) = 5.42$, $p <.05$, $\eta^2= .05$). As showed in Figure 3a, Post Hoc tests showed (Additional file 3) that the OLD group had more interference in the motor task than cognitive task, which was not the case for the YOUNG group. There was no significant difference between YOUNG and OLD for cognitive reverse counting DTE ($t(30) = 0.07$, $p = 0.95$, d = 0.02) but there was a significant difference for motor reverse counting DTE ($t(30) = 2.70$, $p < .05$, d = 0.96).

Sound counting (environment-driven) task

The aim was to assess whether there were differences in motor and cognitive DTE when the cognitive task was environment-driven. There were no significant results for task ($F(1, 30) = 2.11$, $p = 0.16$, $\eta^2 = .03$), group ($F(1, 30) = 0.09$, $p = 0.77$, $\eta^2 = .00$), or interaction effect ($F(1, 30) = 0.00$, $p = 0.93$, $\eta^2 = .00$) (Additional file 2).

Differences between sound counting (environment-driven) and reverse counting (self-generated) DTE

Motor task

The aim was to assess whether there were differences in motor DTE between environment-driven and self-generated tasks. There was a significant task effect ($F(1, 30) = 80.73$, $p < .001$, $\eta^2 = .32$) (Additional file 4). As shown in Figure 3b, the reverse counting task created more DTE than the sound counting task. There was a significant group effect ($F(1, 30) = 8.65$, $p < .01$, $\eta^2 = .13$). The OLD had more considerable interference with motor tasks than the YOUNG group. There was no significant interaction between the task and the group ($F(1, 30) = 2.10$, $p = 0.16$, $\eta^2 = .01$).

Cognitive tasks

The aim was to assess whether there were differences in cognitive DTE between environment-driven and self-generated tasks. There were no significant results for task ($F(1, 30) = 1.48$, $p = 0.23$, $\eta^2 = .02$), group ($F(1, 30) = 0.01$, $p = 0.91$, $\eta^2 = .00$), or interaction effect ($F(1, 30) = 001$, $p = 0.92$, $\eta^2 = .00$) (Additional file 4).

Discussion

Following the interest in the evaluation of DT capacities of older adults, numerous cognitive-motor DT tests have been created these past few years. However, evidence is weak concerning the sensitivity of these tests and the motor and cognitive interferences they generate.

The first step of this study was to verify if the tasks were effective in showing differences between age groups. DT tests (cognitive and motor tasks, for the two DT tests) and cognitive tasks in ST were effective in showing the effect of cognitive aging. However, there was no difference between the two groups for motor ST. The participants were in good physical and cognitive health, which limits the difference between young and old, especially if the task is

performed at a “preferred” pace (the motor task is the only one with a “natural” pace). The cognitive task had to be done as quickly as possible for the reverse counting task and at an external pace for the sound counting task. Finally, the motor task was complex but not novel since participants are often confronted with stairs in their daily lives. This may reduce the potential for differences between young and old.

The main objective was to determine the age-related effect of cognitive tasks (self-generated – context-independent and controlled by the individual – and environment-driven – context-dependent and not generated by the individual) on cognitive and motor DTE. The generation mode of cognitive tasks affected motor DTE since the self-generated task (reverse counting) created motor interference for the two groups, but the environment-driven task (sound counting) did not. This may be explained by differences in the processes involved (monitoring for the sound counting task but maintenance and processing the reverse counting task). Therefore, depending on the type of task, dual-task behavior might differ. The meta-analysis of Bahureksa et al. (2017) showed that to impact gait on DT, the cognitive task must be difficult and require a high cognitive load. They showed that walking combined with an arithmetic task appeared more effective than verbal fluency in discriminating MCI patients. The more cognitive resources the task requires, the greater the impact on motor performance and spatiotemporal gait parameters during the DT. The present study confirmed previous results on gait tasks, with new information on motor complex tasks. Self-generated tasks created more interference than environment-driven tasks, as Al-Yahya et al. (2011) results suggested with walking tasks. Moreover, the sensory modalities (e.g., auditory vs. visual inputs, vocal vs. manual outputs) of cognitive tasks may affect the interference in dual-task performance. In this study, the vocal output, which involves language production during the task during the self-generated tests, may be the source of the interference.

In the self-generated task, the OLD group had more motor interference than the YOUNG group. As indicated by Wollesen and Voelcker-Rehage (2014), the reduced capacity hypothesis suggests that to achieve the same performance level, a motor task exerts a higher demand on the attentional resources of older adults than on younger ones. Due to this, DT costs appeared to be greater in older adults than in younger adults (Albinet et al., 2006). However, age did not affect the motor task in environment-driven DTE. The cognitive task did not generate enough interference to perceive the effect of age.

In self-generated DT, YOUNG and OLD prioritize their cognitive task at the expense of motor performance, and once again, the older adults exhibited greater interference. These results echo the results from Shumway-Cook et al. (1997), which showed that healthy young and older adults prioritized the cognitive task when the postural task did not represent a significant threat. However, the postural threat could reverse this priority. Brown et al. (2002) revealed that when postural threat increases, older adults' postural stability was enhanced at the expense of the second cognitive task (whereas they found the opposite in non-threat situations). The "Posture First" principle is used when the postural threat requires an allocation of attentional resources to ensure postural control at the expense of cognitive performance. In a literature review, Schaefer et Schumacher (2011) pointed out that older adults tend to prioritize gait performance over cognitive tasks, which might be explained by protecting themselves from falls. Older adults often show higher interferences than young adults and tend to prioritize the motor domain (Schaefer, 2014). In the present study, there was a higher cost on the motor task for the older adults than younger adults too, but no deterioration in the cognitive task. The difference between our results and those of previous studies may be explained by the novelty of the task rather than its complexity influencing interference. In the present study, the STEP task was complex but not new. Moreover, "Posture First" might appear especially on tasks requiring balance or gait. Task prioritization tends to be more pronounced when people are very

challenged and when the motor task involves some threat to balance or risk of falling (Verghese et al., 2007; Woollacott & Shumway-Cook, 2002). It would be interesting to increase the task's difficulty by asking participants to perform the motor task as quickly as possible to determine whether this influences cognitive interference. To compare the amounts of interference, it would also be relevant to conduct this DT with other profiles of older adults, such as people with a risk of falling or with cognitive impairments.

For environment-driven DT, the YOUNG group prioritized the motor task over the cognitive task, while the OLD group deteriorated both tasks. Nevertheless, there was no difference between cognitive and motor DTE among the age groups. The cognitive task was perhaps too easy to create interference. In their study with 32 young adults (mean age = 25.0 years) and 32 older adults (mean age = 73.6 years), Lövdén et al. (2008) demonstrated that, regardless of age, an easy cognitive task (1-back) reduced motor interference (walking on a treadmill at a preferred speed) compared to performing a motor task alone. This suggests that automated motor tasks are more efficient when attention is focused on something else. Furthermore, increasing the working memory load (moving from 1-back to 4-back) again reduced motor interference in young adults but not in older adults, who experienced motor interference starting from the more difficult level (2-back). A year later, the research team (Verrel et al., 2009) extended this paradigm by adding a group of older adults even older (ages 70–80), compared to younger older adults (ages 60–70) and young adults (ages 20–30). They showed that increasing the difficulty of the cognitive task had a more significant impact on participants with fewer resources (i.e., older adults). In the present study, it is possible that young adults were able to benefit from an external focus of attention induced by an easy cognitive task (Stoffregen et al., 1999; Swan et al., 2004), which was not the case for older adults.

The generation mode of the cognitive task did not impact cognitive interference in DT in the present study. The cognitive self-generated DTE was very slight compared to the environment-driven DTE for the YOUNG and OLD groups. However, the interference in cognitive self-generated DT was inflated by a few extreme values, and there was no significant difference between cognitive conceptually driven and environment-driven DTE. Although the generation mode of the cognitive task had an impact on the motor task, it did not affect the cognitive performance.

Future studies must examine whether the present findings generalize to dual-task situations that use more complex and difficult tasks. Indeed, Ehsani et al. (2019) showed that a non-habitual motor task, such as repeated elbow flexion, was more demanding than an everyday task, such as a walking task. The unfamiliar motor task may require more motor cortex activation, creating more dual-task interference. Although we support the importance of creating ecological tests and therefore involving situations close to everyday life (such as the STEP task, which is similar to climbing stairs), it would be interesting to study novel tasks to help better understand the effect of novelty on the motor and cognitive interference of the DT tests. Moreover, to enhance ecological tests, it would be valuable to include tasks that involve a risk of falls or balance challenges, such as crossing uneven terrain like a forest path, a broken sidewalk, or an area with irregular cobblestones. These scenarios can cause significant imbalance and simulate the daily challenges faced by older adults or individuals with balance disorders.

In this study, the focus was on comparing two modes of generation: self-generated vs. environment-driven. However, the nature of the task may be responsible for the differential interference. Fallahtafti and colleagues (2021) conducted a study with 20 older adults (mean age = 71 years) who completed three self-generated cognitive tasks (i.e., verbal fluency, categorical fluency, serial subtraction) both in a seated condition and while walking on a

treadmill at a self-selected pace. Both fluency tasks resulted in motor and cognitive costs (with a higher cognitive cost for categorical fluency), while the serial subtraction task generated motor interference and cognitive facilitation. Thus, the mode of generation (self-generated vs. environment-driven), the novelty, the difficulty, and the nature of the task: all influence the level of interference.

This study involved a small sample size and mainly women, which limited its generalizability and included only healthy participants, potentially overlooking the variability in interference observed in populations with mobility or cognitive impairments. This study presented new DT tests that effectively showed the age effect. Some ideas were devised for creating interference-efficient tests, like using cognitive self-generated (context-independent and generated by the individual) and motor complex tasks. Indeed, the generation mode of cognitive tasks affected motor DTE, since the self-generated task created motor interference for the two groups (with a greater gap between older and younger adults), but the environment-driven task (context dependent and not controlled by the individual) did not. In self-generated DT, YOUNG and OLD prioritize their cognitive task at the expense of motor performance, and the older adults had a greater interference. More studies with larger samples are needed to confirm these results and to test the efficiency and sensitivity of these DT tests in an interventional design.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors report no conflict of interest.

Data availability

Data, analytic methods, and study materials will be made available to other researchers upon request to the authors.

Institutional Review Board

The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki. It is a preparatory study for a more extensive study approved by the Institutional Review Board (Research Ethics Committee of the XX n462, on 14 February 2023) and registered on ClinicalTrials.gov (NCT05991011 at https://clinicaltrials.gov/study/NCT05991011?cond=older%20adults&term=moving&rank=9

Authors contribution

NBP (data curation, formal analysis, investigation methodology, project administration, writing -original draft, writing – review and editing), AP (methodology, project administration, supervision, writing -original draft, writing – review and editing), FM (writing – review and editing), PM (methodology, project administration, supervision, writing -original draft, writing – review and editing).

References

Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology and motor skills research: Some applications and methodological constraints. *J Human Movement Studies*, *14*, 101–132.

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., Lutz, K., Zizlsperger, L., Luft, A. R., Guimarães, V., Schättin, A., & de Bruin, E. D. (2020). Effects of an In-home Multicomponent Exergame Training on Physical Functions, Cognition, and Brain Volume of Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Medicine*, *6*, 321. https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00321

Albinet, C., Bernard, P. L., & Palut, Y. (2006). Attentional control of postural stability in institutionalised elderly people: Effects of a physical exercise program. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique: Revue Scientifique de La Societe Francaise de Reeducation Fonctionnelle de Readaptation et de Medecine Physique*, *49*(9), 625–631. https://europepmc.org/article/med/16859801

Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *35*(3), 715–728. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008

Bahureksa, L., Najafi, B., Saleh, A., Sabbagh, M., Coon, D., Mohler, M. J., & Schwenk, M. (2017). The Impact of Mild Cognitive Impairment on Gait and Balance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Studies Using Instrumented Assessment. *Gerontology*, *63*(1), 67–83. https://doi.org/10.1159/000445831

Beauchet, O., & Berrut, G. (2006). Marche et double tâche: Définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé. *Psychol NeuroPsychiatr Vieil*, *4*.

Béraud-Peigné, N., Maillot, P., & Perrot, A. (2024). The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults. *GeroScience*, *46*(2), 1825–1841. https://doi.org/10.1007/s11357-023-00952-w

Bock, O. (2008). Dual-task costs while walking increase in old age for some, but not for other tasks: An experimental study of healthy young and elderly persons. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *5*(1), 27. https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-27

Boisgontier, M. P., Beets, I. A. M., Duysens, J., Nieuwboer, A., Krampe, R. T., & Swinnen, S. P. (2013). Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks: Increased recruitment of generic cognitive resources in older adults. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(8), 1824–1837. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.07.014

Brown, L. A., Sleik, R. J., Polych, M. A., & Gage, W. H. (2002). Is the Prioritization of Postural Control Altered in Conditions of Postural Threat in Younger and Older Adults? *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *57*(12), M785–M792. https://doi.org/10.1093/gerona/57.12.M785

Chauvel, G., Maquestiaux, F., Hartley, A. A., Joubert, S., Didierjean, A., & Masters, R. S. W. (2012). Age Effects Shrink when Motor Learning is Predominantly Supported by Nondeclarative, Automatic Memory Processes: Evidence from Golf Putting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(1), 25–38. https://doi.org/10.1080/17470218.2011.588714

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioural sciences. Hillsdale, New Jersey: L. *Lea*, *56*, 102.

Corrigan, J. D., & Hinkeldey, N. S. (1987). Relationships between Parts A and B of the Trail Making Test. *Journal of Clinical Psychology*, *43*(4), 402–409.

https://doi.org/10.1002/1097-4679(198707)43:4<402::AID-JCLP2270430411>3.0.CO;2-E

Ebersbach, G., Dimitrijevic, M. R., & Poewe, W. (1995). Influence of Concurrent Tasks on Gait: A Dual-Task Approach. *Perceptual and Motor Skills*, *81*(1), 107–113. https://doi.org/10.2466/pms.1995.81.1.107

Ehsani, H., Mohler, M. J., O'Connor, K., Zamrini, E., Tirambulo, C., & Toosizadeh, N. (2019). The association between cognition and dual-tasking among older adults: The effect of motor function type and cognition task difficulty. *Clinical Interventions in Aging*, *Volume 14*, 659–669. https://doi.org/10.2147/CIA.S198697

Falbo, S., Condello, G., Capranica, L., Forte, R., & Pesce, C. (2016). Effects of Physical-Cognitive Dual Task Training on Executive Function and Gait Performance in Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *BioMed Research International*, *2016*, 1–12. https://doi.org/10.1155/2016/5812092

Fallahtafti, F., Boron, J. B., Venema, D. M., Kim, H. J., & Yentes, J. M. (2021). Task specificity impacts dual-task interference in older adults. *Aging Clinical and Experimental Research*, *33*(3), 581–587. https://doi.org/10.1007/s40520-020-01575-3

Fuster, J. M. (2008). *The prefrontal cortex, fourthth edn*. Academic, London.

Hartley, A. A. (1992). Attention. In *F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.) The handbook of aging and cognition* (pp. 3–49). NJ: Erlbaum.

Hartley, A. A., & Little, D. M. (1999). Age-related differences and similarities in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*(4), 416. https://doi.org/10.1037/0096-3445.128.4.416

Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central

interference. *Cognitive Psychology*, *52*(4), 291–345. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.11.001

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). NJ: Prentice-Hall.

Lövdén, M., Schaefer, S., Pohlmeyer, A. E., & Lindenberger, U. (2008). Walking Variability and Working-Memory Load in Aging: A Dual-Process Account Relating Cognitive Control to Motor Control Performance. *The Journals of Gerontology: Series B*, *63*(3), P121–P128. https://doi.org/10.1093/geronb/63.3.P121

Maquestiaux, F. (2012). La simultanéité des actes psychiques: Apports du protocole PRP. *année psychologique*, *4*, 631–662.

Maquestiaux, F. (2017). *Psychologie de l'attention*. De Boeck Supérieur. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=Hz83DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=maquestiaux+2017&ots=VaBuOBY1db&sig=ZjJrwLgcatjhUu2NV-oZJnMD6v4

Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, Perception & Psychophysics*, *80*(3), 752–772. https://doi.org/10.3758/s13414-017-1469-4

McIsaac, T. L., Lamberg, E. M., & Muratori, L. M. (2015). Building a Framework for a Dual Task Taxonomy. *BioMed Research International*, *2015*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2015/591475

Muir-Hunter, S. W., & Wittwer, J. E. (2016). Dual-task testing to predict falls in community-dwelling older adults: A systematic review. *Physiotherapy*, *102*(1), 29–40. https://doi.org/10.1016/j.physio.2015.04.011

Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*(2), 220.

Pellegrini-Laplagne, M., Dupuy, O., Sosner, P., & Bosquet, L. (2022). Effect of simultaneous exercise and cognitive training on executive functions, baroreflex sensitivity, and pre-frontal cortex oxygenation in healthy older adults: A pilot study. *GeroScience*. https://doi.org/10.1007/s11357-022-00595-3

Plummer, P., Eskes, G., Wallace, S., Giuffrida, C., Fraas, M., Campbell, G., Clifton, K.-L., & Skidmore, E. R. (2013). Cognitive-motor interference during functional mobility after stroke: State of the science and implications for future research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *94*(12), 2565–2574. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.08.002

Rahe, J., Petrelli, A., Kaesberg, S., Fink, G. R., Kessler, J., & Kalbe, E. (2015). Effects of cognitive training with additional physical activity compared to pure cognitive training in healthy older adults. *Clinical Interventions in Aging*, *10*, 297–311. https://doi.org/10.2147/CIA.S74071

Schaefer, S. (2014). The ecological approach to cognitive–motor dual-tasking: Findings on the effects of expertise and age. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1167.

Schaefer, S., & Schumacher, V. (2011). The Interplay between Cognitive and Motor Functioning in Healthy Older Adults: Findings from Dual-Task Studies and Suggestions for Intervention. *Gerontology*, *57*(3), 239–246. https://doi.org/10.1159/000322197

Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime reference guide*. Psychology Software Tools, Incorporated.

Schoene, D., Lord, S. R., Delbaere, K., Severino, C., Davies, T. A., & Smith, S. T. (2013). A Randomized Controlled Pilot Study of Home-Based Step Training in Older People Using Videogame Technology. *PLoS ONE*, *8*(3), e57734. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057734

Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The Effects of Two Types of Cognitive Tasks on Postural Stability in Older Adults With and Without a History of Falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *52A*(4), M232–M240. https://doi.org/10.1093/gerona/52A.4.M232

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*(6), 643–662. https://doi.org/10.1037/h0054651

Theill, N., Schumacher, V., Adelsberger, R., Martin, M., & Jäncke, L. (2013). Effects of simultaneously performed cognitive and physical training in older adults. *BMC Neuroscience*, *14*(1), Article 1. https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-103

Treisman, A. M. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, *76*(3), 282–299. https://doi.org/10.1037/h0027242

Tsai, C.-L., Pan, C.-Y., Chen, F.-C., & Tseng, Y.-T. (2017). 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*, *9*, 294. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00294

Verghese, J., Kuslansky, G., Holtzer, R., Katz, M., Xue, X., Buschke, H., & Pahor, M. (2007). Walking While Talking: Effect of Task Prioritization in the Elderly. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *88*(1), 50–53. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.10.007

Verrel, J., Lövdén, M., Schellenbach, M., Schaefer, S., & Lindenberger, U. (2009). Interacting effects of cognitive load and adult age on the regularity of whole-body motion during treadmill walking. *Psychology and Aging*, *24*(1), 75–81. https://doi.org/10.1037/a0014272

Wechsler, D. (1997). *WMS-III: Wechsler memory scale administration and scoring manual* (Harcourt Brace&Co). The Psychological Corporation.

Wickens, C. D., Vidulich, M., & Sandry-Garza, D. (1984). Principles of S-C-R Compatibility with Spatial and Verbal Tasks: The Role of Display-Control Location and Voice-Interactive Display-Control Interfacing. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *26*(5), 533–543. https://doi.org/10.1177/001872088402600505

Wollesen, B., & Voelcker-Rehage, C. (2014). Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults: A systematic review. *European Review of Aging and Physical Activity*, *11*(1), 5–24. https://doi.org/10.1007/s11556-013-0122-z

Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, *16*(1), 1–14. https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4

Tables

Table 1. Means of age, weight, BMI, height, and subjective health for YOUNG and OLD groups

	YOUNG (*n* = 15)		**OLD** (*n* = 17)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Age (years)	23.47	2.13	71.06	5.31
Weight (kg)	61.13	14.74	68.32	10.74
Height (cm)	169.00	10.04	166.47	10.20
BMI	21.14	3.13	24.63	3.00
Subjective health (n)	4.27	0.46	3.88	0.49
Corsi – Visuospatial span	8.47	1.96	6.35	1.46
Corsi – Backward visuospatial span	8.47	2.10	5.53	1.91
Stroop – Inhibition score	0.62	0.14	0.51	0.17
Trail Making Test – Time B-A	19.16	9.09	60.88	53.51

Note: BMI = Body Mass Index; cm = centimeter; M = mean; n = number; SD = standard deviation

Table 2. Descriptive results on ST for YOUNG and OLD groups

	YOUNG		OLD	
	M (*SD*)	95% CI	*M* (*SD*)	95% CI
Simple Task (ST)				
Cognitive environment-driven - sound counting (n)	0.87 (1.13)	0.00 – 4.00	3.82 (5.32)	0.00 – 16.00
Cognitive self-generated - reverse counting (n)	21.07 (13.55)	3.00 – 50.00	11.59 (9.35)	0.00 – 35.00
Motor - STEP(n)	23.33 (4.43)	17.00 – 34.00	22.82 (3.88)	17.00 – 29.00

Note: DT = dual-task; DTE = dual-task effect (calculation: (DT-ST)/$_{MeanGroup}$ST); M = mean; SD = standard deviation; ST = simple-task.
The cognitive environment-driven - sound counting ST score is the difference between the actual number of beeps and the number the participant gave, in ST. The cognitive self-generated - reverse counting ST score is the number of correct answers, in ST. The Motor – STEP ST score, the value is the number of round trips, in ST.

Table 3. Descriptive results on DT and DTE for YOUNG and OLD groups

	YOUNG				OLD			
	Cognitive		*Motor*		*Cognitive*		*Motor*	
	M (*SD*)	95% CI	*M* (*SD*)	95% CI	*M* (*SD*)	95% CI	*M* (*SD*)	95% CI
Dual-Task (DT)								
Environment-driven - sound counting (n)	1.27 (1.33)	0.00 – 5.00	24.53 (3.87)	19.00 – 35.00	5.35 (5.96)	0.00 – 18.00	21.41 (3.61)	16.00 – 27.00
Self-generated - reverse counting (n)	19.47 (12.22)	3.00 – 42.00	19.80 (3.28)	13.00 – 24.00	10.76 (9.26)	3.00 – 42.00	15.00 (5.34)	5.00 – 24.00
Dual Task Effect (DTE)								
Environment-driven - sound counting (n)	-0.46 (1.99)	-5.77 – 3.46	0.06 (0.14)	-0.34 – 0.21	-0.40 (1.31)	-4.19 – 1.57	-0.06 (0.17)	-0.48 – 0.26
Self-generated - reverse counting (n)	-0.08 (0.19)	-0.52 – 0.24	-0.15 (0.19)	-0.51 – 0.21	-0.07 (0.24)	-0.69 – 0.26	-0.34 (0.17)	-0.61 – -0.04

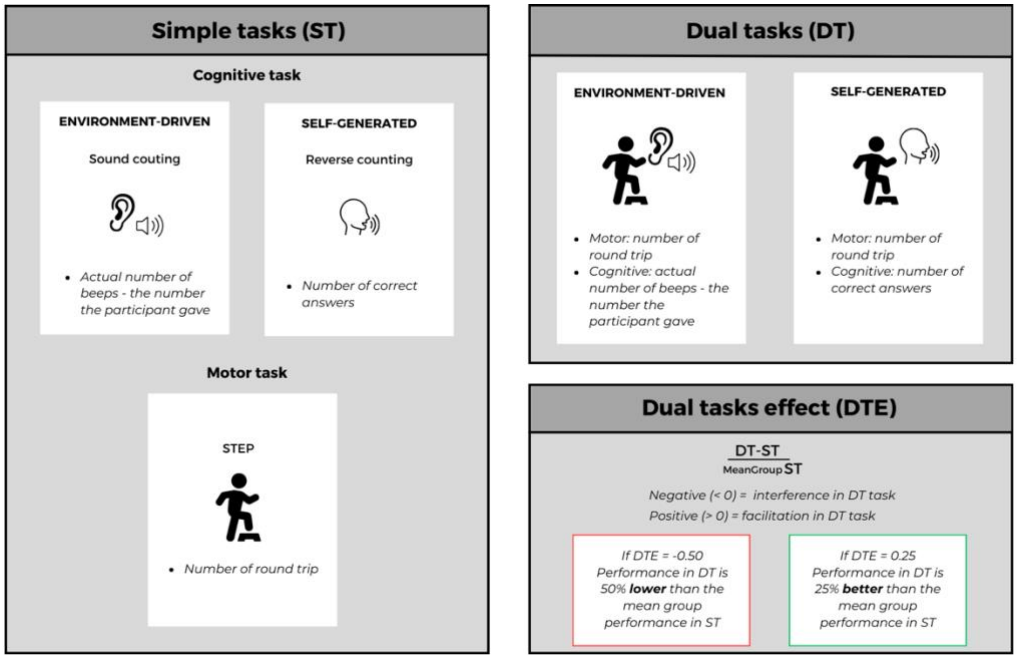
Note: DT = dual-task; DTE = dual-task effect (calculation: (DT-ST)/ $_{MeanGroup}$ST); M = mean; SD = standard deviation; ST = simple-task.

For the DT. The cognitive environment-driven - sound counting DT score is the difference between the actual number of beeps and the number the participant gave, in DT. The cognitive self-generated - reverse counting DT score is the number of correct answers, in DT. The Motor – STEP DT score, the value is the number of round trips, in DT.

For the DTE. The DTE was a calculated measure to understand the relative impact of DT compared to ST performance (calculation: (DT-ST)/ $_{MeanGroup}$ST). A positive DTE indicated better performance in DT than in ST (a benefit), while a negative DTE indicated worse performance in DT than in ST (a cost).

Figures

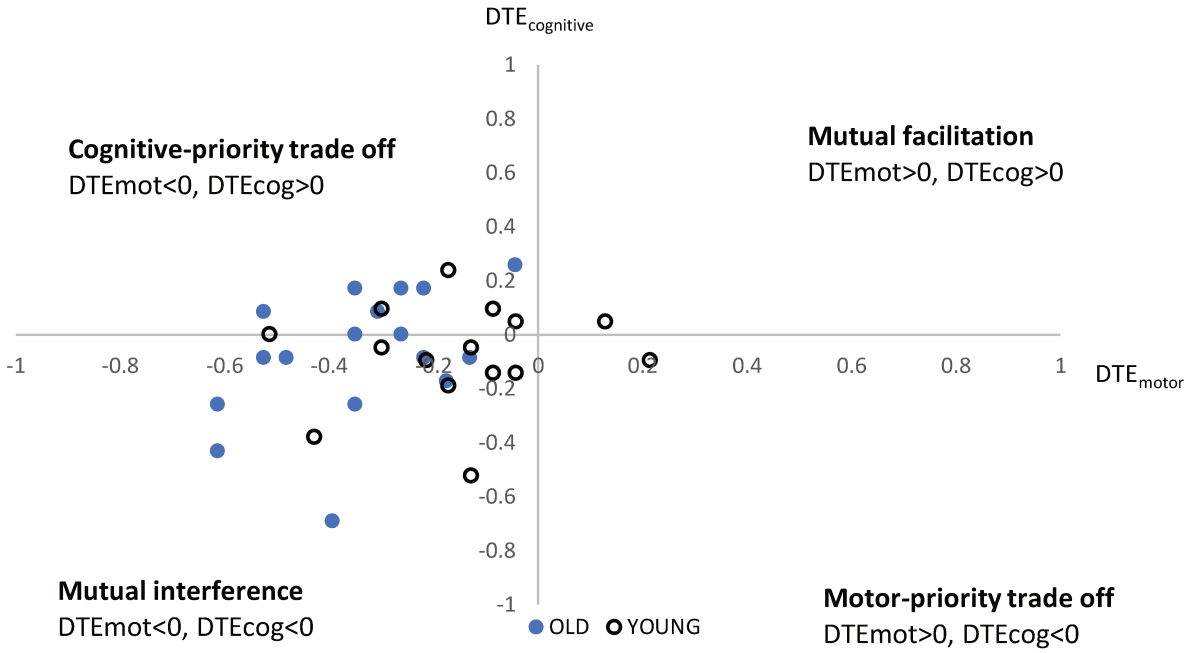
Figure 1. Description of ST, DT and DTE



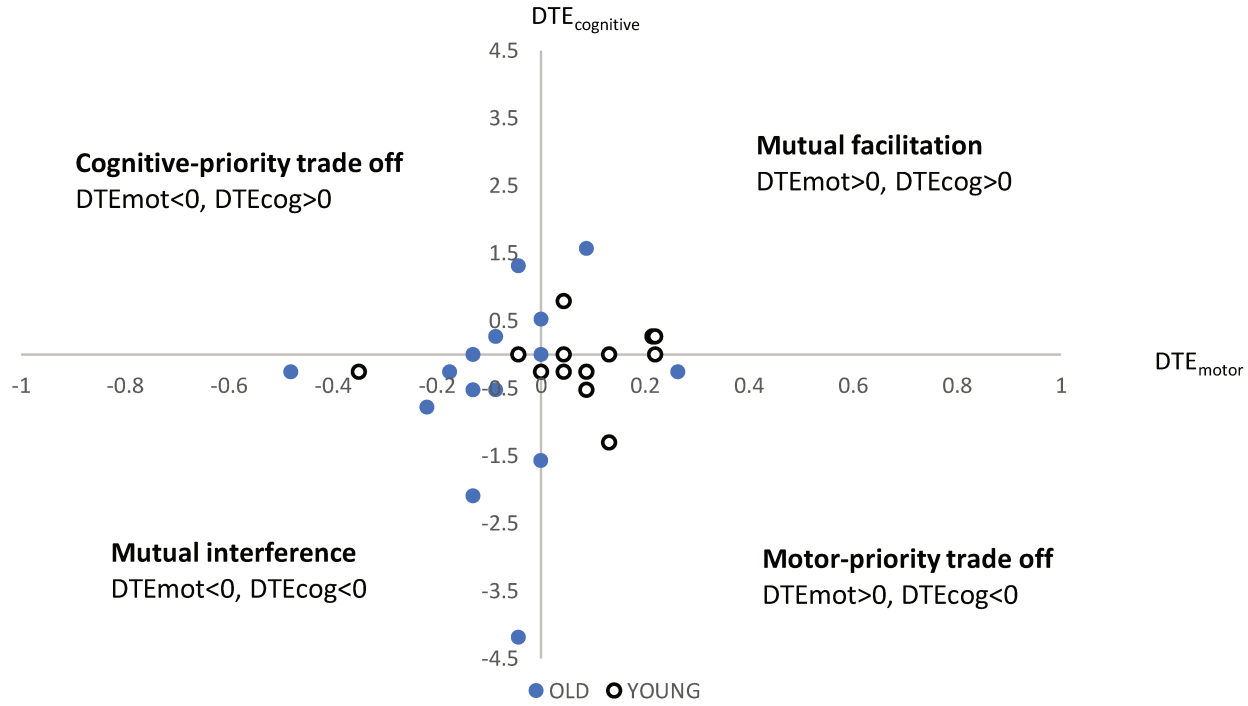
Notes: DT = dual-task; DTE = dual-task; ST = simple-task.

Figure 2. Performance operating characteristic

(a) self-generated DTE



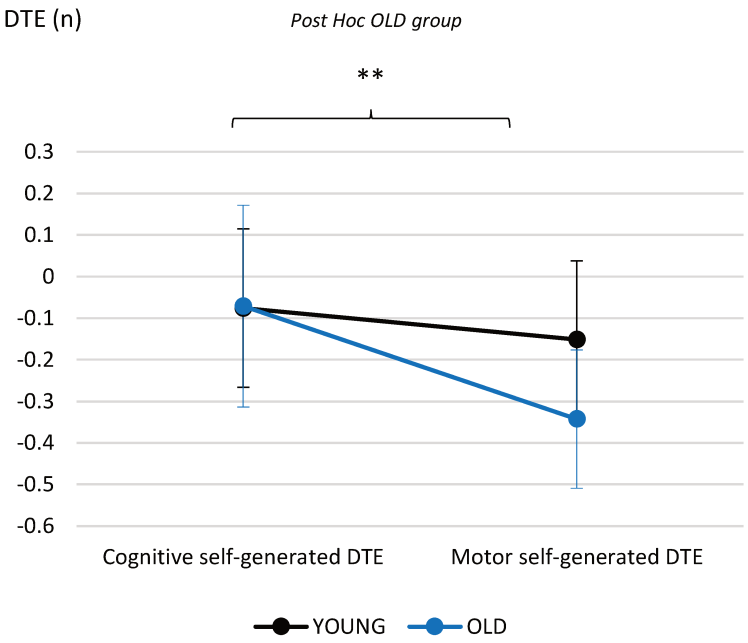
(b) environment-driven DTE



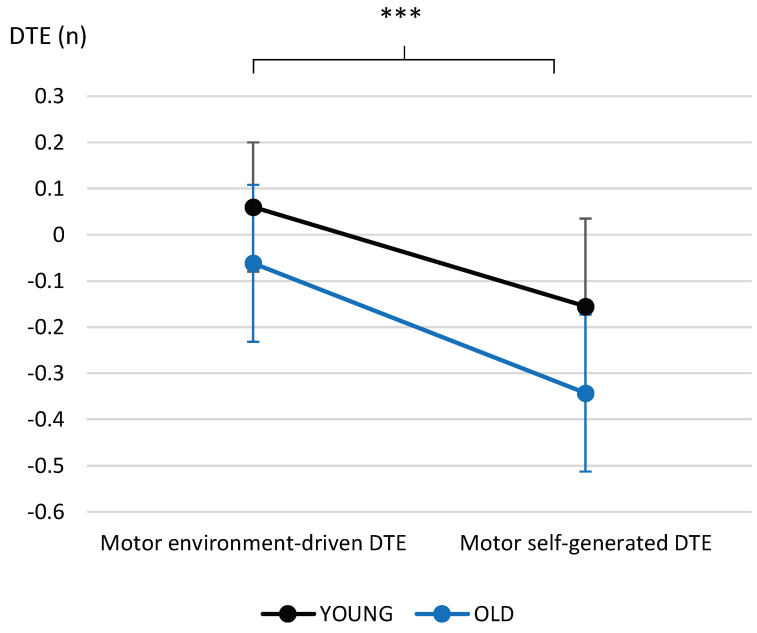
Notes: DTEmotor = Dual-Task Effect on motor task; DTEcog = Dual-Task Effect on cognitive task.

Figure 3. Age-related variations in cognitive and motor interference

(a) Difference between cognitive and motor interference as a function of age



(b) Impact of cognitive task on motor interference as a function of age



Notes: DTE = Dual-Task Effect; ** = $p < .01$; *** = $p < .001$.

Figure captions

Figure 2. Description of ST, DT and DTE

Figure 2. Performance operating characteristic

(a) self-generated DTE

(b) environment-driven DTE

Notes: DTEmotor = Dual-Task Effect on motor task; DTEcog = Dual-Task Effect on cognitive task.

Figure 3. Age-related variations in cognitive and motor interference

(a) Difference between cognitive and motor interference as a function of age

(b) Impact of cognitive task on motor interference as a function of age

Notes: DTE = Dual-Task Effect; ** = $p < .01$; *** = $p < .001$.

Annexe 6. Différences liées à l'âge entre les DTE cognitif et moteur (ANOVA) (étude 3)

	F	*p*	η^2
DTE autogénéré			
Tâche	16,96	**< 0,001**	**0,15**
Tâche * groupe	5,42	**0,027**	**0,05**
Groupe	2,69	0,112	0,04
DTE environnement			
Tâche	2,11	0,157	0,03
Tâche * groupe	0,09	0,767	0,00
Groupe	0,01	0,931	0,00

Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche).*

Annexe 7. Analyses post hoc sur les différences d'âge entre la tâche physique et motrice sur le DTE autogénéré (étude 3)

		IC à 95 % pour la différence des moyennes		*t*	*p*	*d*
		Bas	Haut			
Âgés, autogénérée, DTE cognitif	Jeunes, autogénérée DTE cognitif	-0,19	0,20	0,07	0,95	0,02
	Âgés, autogénérée, DTE moteur	0,11	0,43	4,71	**< 0,001**	**1,36**
	Jeunes, autogénérée, DTE moteur	-0,11	0,27	1,13	0,69	0,40
Jeunes, autogénérée, DTE cognitif	Âgés, autogénérée, DTE moteur	-0,07	0,46	3,77	**0,004**	**1,33**
	Jeunes, autogénérée, DTE moteur	-0,10	0,25	1,23	0,69	0,38
Âgés, autogénérée, DTE moteur	Jeunes, autogénérée, DTE moteur	-0,38	0,00	-2,70	**0,019**	**0,96**

Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche)* ; IC à 95 % : intervalle de confiance à 95 %.

Annexe 8. Différences liées à l'âge entre les tâches autogénérée et générée par l'environnement (ANOVA) (étude 3)

	F	*p*	η^2
DTE moteur			
Tâche	66,99	**< 0,001**	**0,32**
Tâche * groupe	1,11	0,157	0,01
Groupe	8,65	**0,006**	**0,12**
DTE cognitif			
Tâche	1,48	0,233	0,02
Tâche * groupe	0,00	0,924	0,00
Groupe	0,01	0,913	0,00

Note. *DTE : Dual-Task Effect (effet de la double-tâche).*

Annexe 9. Premier article relatif à l'étude 3 publié dans Games for Health

The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot

▶ **To cite this version:**

Néva Béraud-Peigné, Pauline Maillot, Alexandra Perrot. The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults. Games for Health Journal, 2023, 12 (3), pp.220-227. 10.1089/g4h.2022.0075 . hal-04426119

HAL Id: hal-04426119
https://hal.science/hal-04426119v1

Submitted on 8 Feb 2024

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

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

Mary Ann Liebert, Inc.

Games for Health Journal
Research, Development, and Clinical Applications

The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults

Journal:	*Games for Health Journal*
Manuscript ID	G4H-2022-0075.R1
Manuscript Type:	Original Article
Keywords:	cognitive health, exergames, game therapy, physical therapy, geriatric fitness
Manuscript Keywords (Search Terms):	exergames, older adults, user experience, physical intensity, workload

SCHOLARONE™
Manuscripts

The User Experience of an Immersive and Interactive Wall Exergame in Older Adults

Néva Béraud-Peigné, PhD Student[1-4],Pauline Maillot, PhD[1-2],and Alexandra Perrot, PhD[3-4]

[1]UFR STAPS, Université Paris Cité, Paris, France.

[2]Université Paris Cité, I3SP, Paris, France.

[3]Université Paris-Saclay, CIAMS, Orsay Cedex, France

[4]Université Paris-Saclay, CIAMS, Orléans, France.

Abstract

Exergames are promising options for modulating the effects of aging on physical and cognitive functions. A new-generation immersive and interactive wall exergame (I2WE) has emerged in recent years, offering users freedom of movement as well as greater and varied interactions with other players, the environment, and the system than traditional games (e.g., WiiÔ, Kinect). These features could improve the user experience (UX) and thus the engagement and benefits of the intervention for older people. The purpose of this study was to determine whether this kind of exergame could be an effective tool for multidomain training for the elderly. An exploratory study was conducted with 38 healthy older adults who tested a single exergame session to evaluate the UX and the perceived enjoyment, as well as the session's workload and intensity. The results show that I2WE generates moderate-to-high physical intensity, following recommendations for older people, while the perceived exertion is lower. Moreover, it creates a positive UX that correlates with high perceived enjoyment while producing a suitable session's workload. I2WE appears to be an effective tool to promote physical activity while concurrently stimulating cognition in older adults. The intrinsic characteristics (i.e., immersion, combined physical and cognitive activity, interactions, complex motor skills, playfulness, and variety of collective games) give this new type of exergame a promising future. Future

studies should be conducted to investigate the effects of an I2WE program on the physical and cognitive functions of older adults.

Keywords: Exergames, Older adults, User experience, Physical intensity, Workload

Aging is accompanied by a normal decrease in physical (e.g., loss of strength and muscle mass, endurance) and cognitive abilities that can be modulated by appropriate training.[1] Consequently, there is a need to develop effective enhancement strategies.[2] In recent decades, research has shown that exergames - active videogames - produce physical and cognitive benefits in older adults (for review, see Monteiro-Junior et al[3]).

However, the research has mainly focused on a first generation of exergames, such as Wii or Kinect. Currently, a new category is being developed, called immersive and interactive wall exergames (I2WEs), with systems such as LUMOplay, Play Lu, iWall, and Neo One. Their collective aspect, variety of games, interactions, and their immersive and playful side could offer a motivating factor in multidomain programs for older people.

More specifically, this type of exergame is beneficial because it makes a cognitive task a relevant prerequisite to successfully solving a motor task (e.g., throwing the ball at a target at the right time, i.e., moving while thinking[4]). These games have an ecological validity, close to the demands of everyday life through stimulation of general motor skills, which could enhance transfer effects.[4]

A recent study[5] showed the benefits of the Play Lu device on interest and motivation. It also revealed moderate-to-high intensity generated by adolescents. This intensity is recommended by ACSM's guidelines[6] to trigger cognitive benefits for the elderly.7,8 If it creates a similar intensity, it is possible that I2WE could modulate the effects of physical activity on cognition in older people.[9]

However, exergames developed for health and disease prevention purposes should be designed according to the expectations and needs of the target users,[10] and I2WE has been the subject of very little research. If not fitted to the elderly, exergame training can lead to cognitive fatigue.[11,12] It would generate a posture first phenomenon or undue stress and thus less engagement in the activity.[13] These aspects could interfere with the gains of the intervention.

In this respect, the session's workload, representing the effort required by the user to accomplish their task, must be balanced to provide sufficient cognitive stimulation while ensuring that the physical intensity is sustained enough to generate physical and cognitive benefits. Workload is a relevant tool to evaluate the system[14] and human performance, as well as to design interactive technologies better aligned with the mental capacities of users.[15]

To create exergames adapted to the needs and desires of participants, Nawaz et al[16] recommend using a user-centered design approach to involve older adults in the development process right from the start. Meanwhile, Campbell[17] recommends developing an iterative stepwise approach, where exploratory trials precede randomized controlled trials to measure health effects.

User experience (UX), or the result of the interaction between the user, the system, and the context, is a metric increasingly used to assess exergaming for the elderly (e.g., Refs.[18-20]). The UX shares many common bases with usability,[21] which now appears insufficient to predict and explain the acceptance of technologies. The UX extends usability by adding emotional, subjective, and temporal aspects that characterize the individual's experience when in contact with technology, which is very important for interactive systems.

Beyond the benefits associated with good usability,[22] a key determinant of high-quality user–system interaction is creation of products with a good UX.[23] Hassenzahl uses a pragmatic–hedonic model of UX,[24] in which individuals perceive the quality of their interactions with products according to two types of attributes: pragmatic qualities, directly related to task accomplishment and product use; and hedonic qualities, which emphasize the psychological well-being of individuals. These two attributes combine to generate a global evaluation of product attractiveness.

Attractiveness leads to behavioral (e.g., increased usage) and emotional (e.g., pleasure) consequences.[24] It is useful to evaluate the pleasure experienced while using exergames in relation to the UX to test the behavioral consequences of Hassenzahl's UX model, especially because of the fun that might encourage players to make movements

beyond those strictly required for the game.[25] In addition, Roto[26] suggests including an additional metric of enjoyment to the UX, as other researchers have done (e.g., Refs.[27,28]).

The purpose of this study was to determine if I2WEs are useful tools for multidomain training. An exploratory trial was set up using a user-centered design approach. Participants tested the new exergame in a single session and filled out a battery of questionnaires. We hypothesized that an I2WE session would create physical intensity in line with the recommendations for older people, with a correct session's workload, and that the UX would be positive and positively related to perceived enjoyment.

Materials and Methods

Participants

Thirty-eight participants (29 women) were included in the study (M= 68.26, SD= 5.53), 81.51% of whom had never played exergames previously. On average, they spent 1008.95 Metabolic Equivalent Tasks (METS) by week (SD= 686.63), evaluated with QAPPA[29] corresponding to a moderate level of physical activity.[29] They responded positively to a call for participation by e-mail or flyers distributed at associations and clubs in Ile-de-France (France).

They met all of the following inclusion criteria: (a) over 60 years old; (b) retired; (c) score of three or more on a subjective health scale (1= very poor, 2= poor, 3= normal, 4= good, and 5= very good); (d) no major pathology; (e) normal or corrected vision and hearing; (f) no difficulty bending or using their shoulders; (g) a certificate of no contraindication to physical activity; and (h) gave a waiver statement.

Protocol

The participants were received at a sports center to perform an exergame session, divided into groups of four participants (4^5 minutes), and then asked to fill in a battery of questionnaires.

For this study, the Neo One device was used (Fig. 1). It is an I2WE equipped with a video projector and infrared sensors that allow playing with no headphones or equipment. Neo One has a catalog of about 20 games, including sports and puzzle games that can be played in cooperation or in opposition.

For this study, the session comprised six games (Fig. 2). It was preceded by 10 minutes of exercise, during which participants gradually warmed up, while learning to throw and bend to retrieve balls. A sports therapist supervised the session. Instructions and rules of the games were displayed on the screen and reexplained by the supervisor if necessary. The supervisor ensured participants' safety by monitoring correct posture.

Measurement tools

Heart rate. During the entire session, the participants' heart rate was measured using a heart rate monitor (Polar Verity Sense). The theoretical maximum heart rate (TMHR) was first calculated using the formula by Gellish and collaborators[30]:

$TMHR = 192 - 0.007 \times age^2$

Their work[30] has reduced the error rate to about 2-5 beats per minute between the ages of 30 and 75. This makes it the most accurate equation for estimating TMHR to date. The following calculation defines the individual average intensity of the session:

$$\text{Average intensity} = \frac{\text{Average heart rate} \times 100}{\text{TMHR}}$$

Questionnaires

AttrakDiff2[31] evaluates the UX and was translated and validated in French.[32] Items are distributed among four scales: (1) pragmatic qualities (usability and perceived level of ease), (2) hedonic quality—stimulation (supports the need for stimulation with new, interesting, and stimulating content, features, and interaction styles), (3) hedonic quality—identity (supports a social function and communicates a certain identity of the user), and (4) overall attractiveness (overall perceived value of the product based on the perception of its pragmatic and hedonic qualities).

NASA Task Load Index (NASA-TLX)[33] evaluates the task's workload. It asks participants to assign a score between 0 and 100 to each of the six dimensions of the workload (i.e., mental demands, physical demands, time pressure, performance, effort, and frustration). Considering that the NASA-TLX is a multidimensional scale, some dimensions may have greater weight compared with others in the total score: a weighting procedure can, thus, be implemented to assign a coefficient to each dimension.

Because these procedures are contested as being time-consuming,[34] researchers[35] suggest simply averaging the six dimensions, calling it the "Raw'' Task Load Index (RTLX). These authors showed that the value obtained is highly correlated with the value obtained by the classic calculation procedure. Cegarra and Morgado[36] verified this property with the French version.

The *physical activity enjoyment scale*,[37] comprising 10 items translated and validated in French,[38] measures the perceived enjoyment during the practice of physical exercise.

The *modified Borg scale*[39] is a metric of perceived exertion during exercise. It is scored on a scale of 0 to 10, linked to different rating words (e.g., very light, difficult, painful effort).

Game preferences. The participants are asked to (1) rank the games in order of preference and (2) state their preferred type of game (i.e., cooperative, competitive, or no preference). They are also asked if they would like to repeat the experience.

Results

Perceived enjoyment, session's workload, and physical intensity

Scores on the physical activity enjoyment scale, the RTLX, the modified Borg scale, and the intensity of the session are provided in Table 1. Perceived enjoyment is high, with a score of 60.71 of 70. Session's workload, evaluated by the RTLX, is correct with a score of 53.46 of 100. The three dimensions related to the task (i.e., mental demand, physical demand, and temporal demand) are balanced and the highest ones, while frustration is the lowest dimension.

Mean intensity is 69.64% of the TMHR, which represents the high limit of moderate intensity. Subjective intensity is rated lower with an average of 4.37, corresponding to perceived exertion rated as easy to moderate.

User experience

Comparison at the threshold. The area of positivity of the AttrakDiff2 items is between 1 and 3, of neutrality between -1 and 1, and of negativity between -1 and -3. Thus, a t-test

was performed to compare the averages for the four AttrakDiff2 items with a value of 1 (Table 2). Three of the four items are significantly greater than 1 ($P < 0.05$) and thus considered positive: hedonic quality stimulation ($M = 1.68$, $SD = 0.81$), hedonic quality identification ($M = 1.32$, $SD = 0.69$), and total attractiveness ($M = 2.08$, $SD = 0.79$). Effect sizes are high for hedonic quality stimulation ($d = 0.84$) and total attractiveness ($d = 1.37$). The pragmatic quality score is not significantly higher than 1. It is therefore considered neutral.

The character of Neo One. According to Hassenzahl's model, four types of product characters can emerge by the strength of attributes. Depending on the scores obtained for the pragmatic and hedonic dimensions, the evaluated system will be positioned in one of the zones, thus defining its character. In this study, Neo One is "desired," with a combination of strong pragmatic and hedonic attributes (Fig. 3). The internal goals of accomplishment and achievement, contact and belonging, and task accomplishment are met.

Correlation between measurements

Total attractiveness corresponds to the overall value of the product based on the perception of pragmatic and hedonic qualities, and this score is therefore used for correlational analyses (Table 3). There is a significant positive correlation between total attractiveness and perceived enjoyment ($r = 0.50$, $P < 0.001$) and a negative correlation with scores of RTLX ($r = -0.34$, $P < 0.05$) and modified Borg scale ($r = -0.36$, $P < 0.05$). Nevertheless, total attractiveness and intensity do not appear to be related ($P > 0.05$).

Game preference and intention to use

Many of the participants expressed no preference regarding the type of game (44.74%), while 36.84% of them said they prefer cooperative games and 18.42% said they prefer competitive games. "Angry Birds Smash" was the favorite one, followed by "Break It Handball," "OXO," "Hit the Beat," and "Oni Goko." To the question "Would you like to repeat this experience?" 84.21% answered yes and 15.79% answered maybe. No participant gave a negative answer.

Discussion

The purpose of this study was to determine whether I2WE could be an effective tool for multidomain training in older adults. The evaluation protocol was based on metrics of previous studies as well as the specific characteristics of this new exergame.

The first hypothesis was that the session's workload is suitable, with physical intensity in line with the ACSM recommendations.[6] The average physical intensity was 69.64% of TMHR, which is at the upper limit of moderate intensity (i.e., 55%–70% of TMHR), suitable to produce benefits.[7],[8] This intensity is generated through a device that requires participants to use their entire body to succeed in the game (e.g., use their upper body to throw balls, move quickly to hit targets, bend down frequently to retrieve the balls from the ground).

This reflects the need to further explore the application of full-body exergames,[10] which could generate greater intensity by using the aerobic pathway and muscular resistance through stimulation of coordination and general motor skills (i.e., gross motor activities),[7],[28],[40],[41] rather than those that lead only to partial stimulation (e.g., Wii).

Moreover, while immersion can increase training intensity, [42] exergames would help to reduce perceived exertion. [43] The participants rated their perceived exertion as between easy and moderate, lower than the actual intensity. The attractive environment created by immersion [44] and/or by interaction with the system, [45] the playfulness, and the collective sessions of this augmented reality exergame can reduce the perceived physical exertion. Indeed, the greater the total attractiveness, the lower the perceived exertion.

Additionally, the session's workload was suitable, which is necessary to stimulate cognitive functions while avoiding potential negative effects. To be more precise, physical, mental, and temporal demands were balanced. This means that participants were able to distribute their resources equally and that there was no prioritization of tasks, as can be the case in dual tasks.

Moreover, the session did not generate frustration and the low score on the performance dimension showed that participants succeeded in reaching their goal, with the immersive aspect allowing better performance. [46] Again, the total attractiveness and

session's workload were negatively related, reflecting the potential for immersion and interaction to modulate the impression of stimulation.

Nevertheless, although NASA-TLX is the gold standard for assessing workload in the field of human–computer interaction, [14] there is no standard for determining whether the workload is too high. Thus, I2WE generates and conceals moderate-to-intense physical intensity in line with the recommendations, while producing a correct session's workload.

The second hypothesis was that the UX is positive and positively related to perceived enjoyment. According to other studies evaluating conventional exergame UX (e.g., Refs. [47-49]), this new kind generated a good UX for the elderly participants. Based on Hassenzahl's model, [24] this is a "desired" attribute. The internal goals of accomplishment, achievement, contact, and belonging and task accomplishment goals were met.

While 81.51% of the participants had never played exergames previously, 84.21% answered that they would like to repeat the experience. This reflects the accessibility of the I2WE, which was not designed specifically for the elderly, and the possibilities of use by them. However, the pragmatic quality item, relating to the instrumental aspects of the system, is not considered positive.

Although the product fulfills its purpose without having a negative impact, [50] the UX could still be improved by increasing pragmatic quality. Its evaluation represents users' perceived ability to use interactive products that allow them to manipulate the environment to accomplish their objectives. Since some aspects of the game, particularly its speed, [51]may have had a negative impact, designers should consider the functional, cognitive, and sensory limitations related to aging. [52]

This is reflected in the participants' game preferences: the two games, that is, "Angry Birds Smash" and "Break It Handball," with simple gameplay and fewer instructions are easier to understand. Therefore, the clarity, structure, and predictability of I2WEs must be designed carefully to be suitable for older people.

Despite this drawback, the present study confirms their potential in creating pleasure for the elderly, [20,27,53,54] which could be one of the only factors constituting motivation to practice physical activity after the age of 70 years. [55] This is even more

positive since the participants had no previous experience with exergames and might therefore have been refractory.

Physical activity paired with technology usually provides more enjoyment than traditional interventions [56] and should therefore be used as a motivating factor. The collective aspect and the presence of a partner could also be factors of pleasure. [57]

According to Hassenzahl's model, [24] the UX will lead to behavioral (e.g., increased usage) and emotional (e.g., enjoyment) consequences that will determine whether the product is appealing or not. In the present study, perceived enjoyment and UX were both high and positively related, with a high effect size.

The main limitation of this study concerns the characteristics of the participants. On the one hand, the study sample is not purely representative of the senior population. It includes more women (n = 28) than men (n = 10). On the other hand, the subjects participated voluntarily in the study, which may affect the results, especially as the aim was to assess their feelings (i.e., enjoyment and UX) about the I2WE.

There is discordance in the literature regarding the choice of methodology to be used to determine whether an exergame is suitable for older adults. Studies generally choose between one and three modalities (e.g., acceptability, effectiveness, usability, engagement) depending not only on the type of study but also on characteristics of the exergame. [16]

In the future, a replicable protocol for evaluating the use of exergames with older adults needs to be developed. Usability is still overused even though it does not seem to be a sufficiently relevant tool. These products need to be evaluated using other metrics, such as UX, to consider more subjective aspects that are omnipresent in the experience, especially with these new exergames.

This exploratory trial showed that I2WEs are favorable tools for multidomain training for the elderly. Still, it would have been interesting to compare this tool with other more classic devices such as Wii or Kinect, which have already shown their benefits. In addition, qualitative data complement the quantitative data [16,58] to provide a better understanding of older adults' experiences with exergames.

This new type of exergame could be applied to rehabilitation and the reeducation environment (e.g., follow-up care and rehabilitation, hospitals) as well as care facilities (e.g., nursing homes, residences) for older people. However, only future larger studies with randomized controlled trials, as recommended by Campbell, [17] to measure the effects of an I2WE program on physical and cognitive functions will be able to demonstrate the clinical benefits.

Conclusions

Although they are not specifically designed for older adults, I2WEs generate a positive UX and high perceived enjoyment. Physical stimulation is of moderate intensity, which activates the aerobic pathway and muscular resistance, using general motor skills. Simultaneous cognitive stimulation is integrated with the physical task, resulting in a correct session's workload.

Moreover, collective practice, great freedom of movement, and variety of games and interactions constitute their richness. Since cognitive training sometimes lacks ecological validity, and physical training lacks playfulness, this new type of I2WE seems to have a promising future.

Authors' Contributions

N.B.-P. was involved in conceptualization (equal); formal analysis (lead); investigation; methodology (equal); writing—original draft (equal); and writing—review and editing (equal). P.M. and A.P. were involved in conceptualization (equal); formal analysis (supporting); methodology (equal); project administration (lead); supervision (lead); writing—original draft (equal); and writing—review and editing (equal).

Acknowledgments

The authors thank the city of Montreuil and the company NeoXperiences for providing the premises and the Neo One immersive and interactive wall.

Author Disclosure Statement

No competing financial interests exist.

Funding Information

No funding was received for this article.

References

1. Daley MJ, Spinks WL. Exercise, mobility and aging. *Sports Medicine*. 2000;29(1):1–12. doi:10.2165/00007256-200029010-00001

2. Colzato LS. Editorial. *Journal of Cognitive Enhancement*. 2017;1(1):1–2. doi:10.1007/s41465-016-0001-4

3. Monteiro-Junior RS, Rodrigues ACMA, Felício LFF, et al. Chapter 37—Exergames: What they are and how they can be used to successful aging? In: Martin CR, Preedy VR, Rajendram R, eds. *Assessments, Treatments and Modeling in Aging and Neurological Disease*. Academic Press; 2021:415–424.

4. Herold F, Hamacher D, Schega L, et al. Thinking while moving or moving while thinking—Concepts of motor-cognitive training for cognitive performance enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2018;10:228. doi:10.3389/fnagi.2018.00228

5. Roure C, Lentillon-Kaestner V, Fargier P. The Effects of a Play Lü Inter-Team Competition Exergame on Adolescents' Moderate-to-Vigorous Physical Activity and Situational Interest. *International Society of Behavioral Nutrition and Physical Activity XChange Virtually*. England; 2021.

6. Swain DP, ACSM, Brawner CA. *ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams & Wilkins; 2012.

7. Audiffren M, André N, Albinet C. Positive effects of chronic physical exercise on cognitive function in older people: Review and prospects. *Revue de Neuropsychologie*. 2011;3(4):207–225. doi:10.3917/rne.034.0207

8. Smith PJ, Blumenthal JA, Hoffman BM, et al. Aerobic exercise and neurocognitive performance: A meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosomatic Medicine*. 2010;72(3):239–252. doi:10.1097/PSY.0b013e3181d14633

9. Colcombe SJ, Kramer AF, Erickson KI, et al. Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2004;101(9):3316–3321. doi:10.1073/pnas.0400266101

10. Gerling K, Mandryk R. Custom-designed motion-based games for older adults: A review of literature in human-computer interaction. *Gerontechnology*. 2014;12(2):68–80. doi:10.4017/gt.2013.12.2.001.00

11. Holtzer R, Shuman M, Mahoney JR, et al. Cognitive fatigue defined in the context of attention networks. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*. 2010;18(1):108–128. doi:10.1080/13825585.2010.517826

12. Lampit A, Hallock H, Valenzuela M. Computerized cognitive training in cognitively healthy older adults: A systematic review and meta-analysis of effect modifiers. *PLoS Medicine*. 2014;11(11):e1001756. doi:10.1371/journal.pmed.1001756

13. Fiatarone Singh MA, Gates N, Saigal N, et al. Resistance training and/or cognitive training in mild cognitive impairment: A randomized, double-blind, double-sham controlled trial. *Journal of the American Medical Directors Association*. 2014;15(12):873–880. doi:10.1016/j.jamda.2014.09.010

14. Hart SG. NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2006;50(9):904–908. doi:10.1177/154193120605000909

15. Longo L. Experienced mental workload, perception of usability, their interaction and impact on task performance. *PLoS One*. 2018;13(8):e0199661. doi:10.1371/journal.pone.0199661

16. Nawaz A, Skjæret N, Helbostad JL, et al. Usability and acceptability of balance exergames in older adults: A scoping review. *Health Informatics Journal*. 2016;22(4):911–931. doi:10.1177/1460458215598638

17. Campbell M. Framework for design and evaluation of complex interventions to improve health. *BMJ*. 2000;321(7262):694–696. doi:10.1136/bmj.321.7262.694

18. Nawaz A, Skjæret N, Ystmark K, et al. Assessing seniors' user experience (UX) of exergames for balance training. In: *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*. ACM: Helsinki, Finland; 2014:578–587. doi:10.1145/2639189.2639235

19. Pyae A, Liukkonen TN, Mika L, et al. Investigating the Finnish elderly people's user experiences in playing digital game-based skiing exercise: A usability study. *Gerontechnology*. 2017;16(2):65–80. doi:10.4017/gt.2017.16.2.002.00

20. Vaziri DD, Aal K, Ogonowski C, et al. Exploring user experience and technology acceptance for a fall prevention system: Results from a randomized clinical trial and a living lab. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2016;13(1):6. doi:10.1186/s11556-016-0165-z

21. Nielsen J. *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann: Boston; 1994.

22. Maguire M. Methods to support human-centred design. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2001;55(4):587–634. doi:10.1006/ijhc.2001.0503

23. Arifin Y, Sastria TG, Barlian E. User experience metric for augmented reality application: A review. *Procedia Computer Science*. 2018;135:648–656. doi:10.1016/j.procs.2018.08.221

24. Hassenzahl M. The thing and I: Understanding the relationship between user and product. In: Blythe MA, Overbeeke K, Monk AF, et al., eds. *Funology*. Human-Computer Interaction Series. Springer Netherlands: Dordrecht; 2003:31–42.

25. Lyons EJ, Tate DF, Ward DS, et al. Engagement, enjoyment, and energy expenditure during active video game play. *Health Psychology*. 2014;33(2):174–181. doi:10.1037/a0031947

26. Roto V. User experience from product creation perspective. *UX Manifesto*. 2007;31:34.

27. Soltani P, Figueiredo P, Vilas-Boas JP. Does exergaming drive future physical activity and sport intentions? *Journal of Health Psychology*. 2020;26(12):2173–2185. doi:10.1177/1359105320909866

28. Temprado J-J. Can exergames be improved to better enhance behavioral adaptability in older adults? An ecological dynamics perspective. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2021;13:670166. doi:10.3389/fnagi.2021.670166

29. de Souto Barreto P, Ferrandez A-M, Saliba-Serre B. Physical Activity Questionnaire for Older Adults (QAPPA): Validation of a new measurement instrument in French. *Science & Sports*. 2011;26(1):11–18. doi:10.1016/j.scispo.2010.09.006

30. Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, et al. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007;39(5):822–829. doi:10.1097/mss.0b013e31803349c6

31. Hassenzahl M, Burmester M, Koller F. AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: Szwillus G, Ziegler J, eds. *Mensch & Computer 2003*. Vieweg+Teubner Verlag: Wiesbaden; 2003:187–196.

32. Lallemand C, Koenig V, Gronier G, et al. Creation and validation of a French version of the AttrakDiff questionnaire for the evaluation of the user experience of interactive systems. *European Review of Applied Psychology*. 2015;65(5):239–252. doi:10.1016/j.erap.2015.08.002

33. Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988;52:139–183. doi:10.1016/S0166-4115(08)62386-9

34. Luximon A, Goonetilleke RS. Simplified subjective workload assessment technique. *Ergonomics*. 2001;44(3):229–243. doi:10.1080/00140130010000901

35. Bittner AC, Byers JC, Hill SG, et al. Generic workload ratings of a mobile air defense system (LOS-F-H). *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. 1989;33(20):1476–1480. doi:10.1177/154193128903302026

36. Cegarra J, Morgado N. Study of the properties of the French version of NASA-TLX. Nice, France; 2009.

37. Kendzierski D, DeCarlo KJ. Physical activity enjoyment scale: Two validation studies. *Journal of Sport & Exercise Psychology*. 1991;13(1):50–64. doi:10.1123/jsep.13.1.50

38. Delignières D, Perez S. Perceived enjoyment of physical activities and sports: Development of an assessment tool. *Revue STAPS*. 1998;45:7–18.

39. Borg GAV. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1982;14(5):377–381. doi:10.1249/00005768-198205000-00012

40. Hötting K, Röder B. Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2013;37(9):2243–2257. doi:10.1016/j.neubiorev.2013.04.005

41. Grégoire C-A, Berryman N, St-Onge F, et al. Gross motor skills training leads to increased brain-derived neurotrophic factor levels in healthy older adults: A pilot study. *Frontiers in Physiology*. 2019;10:410. doi:10.3389/fphys.2019.00410

42. Finkelstein S, Suma EA. Astrojumper: Motivating exercise with an immersive virtual reality exergame. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2011;20(1):78–92. doi:10.1162/pres_a_00036

43. Barry G, van Schaik P, MacSween A, et al. Exergaming (XBOX Kinect™) versus traditional gym-based exercise for postural control, flow and technology acceptance in healthy adults: A randomized controlled trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2016;8(1):25. doi:10.1186/s13102-016-0050-0

44. Mestre DR, Ewald M, Maiano C. Virtual reality and exercise: Behavioral and psychological effects of visual feedback. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2011;167:122–127. doi:10.3233/978-1-60750-766-6-122

45. Radman I. Interactive dance: An exciting way to enhance children's physical activity level. *Kinesiology*. 2014;46:67–74.

46. Murray EG, Neumann DL, Moffitt RL, et al. The effects of the presence of others during a rowing exercise in a virtual reality environment. *Psychology of Sport and Exercise*. 2016;22:328–336. doi:10.1016/j.psychsport.2015.09.007

47. Adcock M, Sonder F, Schättin A, et al. A usability study of a multicomponent video game-based training for older adults. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2020;17(1):3. doi:10.1186/s11556-019-0233-2

48. Da Silva Júnior JLA, Biduski D, Bellei EA, et al. A bowling exergame to improve functional capacity in older adults: Co-design, development, and testing to compare the progress of playing alone versus playing with peers. *JMIR Serious Games*. 2021;9(1):e23423. doi:10.2196/23423

49. Gerling KM, Schild J, Masuch M. Exergaming for elderly: Analyzing player experience and performance. In: *Mensch & Computer 2011*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH; 2011:401–411.

50. Lallemand C, Gronier G. *Méthodes de Design UX: 30 Méthodes Fondamentales Pour Concevoir et Évaluer Les Systèmes Interactifs*. Eyrolles: Paris; 2015.

51. Liukkonen TN, Ahtosalo H, Heinonen T, et al. Motion tracking exergames for elderly users. *IADIS International Journal of Computer Science and Information Systems*. 2015;10(2):52–64.

52. Loos E. Exergaming: Meaningful play for older adults? In: Zhou J, Salvendy G, eds. *Human Aspects of IT for the Aged Population*. Springer International Publishing: Cham; 2017:254–265.

53. Rebsamen S, Knols RH, Pfister PB, et al. Exergame-driven high-intensity interval training in untrained community-dwelling older adults: A formative one-group quasi-experimental feasibility trial. *Frontiers in Physiology*. 2019;10:1019. doi:10.3389/fphys.2019.01019

54. Schoene D, Valenzuela T, Toson B, et al. Interactive cognitive motor step training improves cognitive risk factors of falling in older adults: A randomized controlled trial. *PLoS One*. 2015;10(12):e0145161. doi:10.1371/journal.pone.0145161

55. Maillot P, Becquard C, Perrot A. Motivation of people to engage in physical activity. *Gérontologie et Société*. 2018;40(2):127. doi:10.3917/gs1.156.0127

56. Valenzuela T, Okubo Y, Woodbury A, et al. Adherence to technology-based exercise programs in older adults: A systematic review. *Journal of Geriatric Physical Therapy*. 2018;41(1):49–61. doi:10.1519/JPT.0000000000000095

57. Freed SA, Sprague BN, Stephan AT, et al. Feasibility and enjoyment of exercise video games in older adults. *Frontiers in Public Health*. 2021;9:751289. doi:10.3389/fpubh.2021.751289

58. Marston HR, Kroll M, Fink D, et al. Flow experience of older adults using the IStoppFalls exergame. *Games and Culture*. 2016;11(1–2):201–222. doi:10.1177/1555412015605219

FIG. 1. Neo One device.

Terms and conditions:
5 minutes, foam ball in hand, easy difficulty

4 to 0	**Cooperative**
Oni Gokko. Participants must complete several challenges in the form of mini-games: Hangman, Hunt and Seek, Memory and Mixed Letters games. The objective is to win as many points as possible. ***Angry Birds Smash.*** This game consists of destroying as many fortresses and pigs as possible on the screen to pass the levels. The objective is to succeed in the different levels and reach the highest score in the time limit. ***Break It Handball.*** This game consists of aiming at the various bricks that appear on the screen to pass the levels. The objective of the game is to succeed the different levels and reach the highest score in the time limit.	
2 to 2	**Competitive**
OXO. This game is based on the mechanics of tic-tac-toe. The objective is to align 3 symbols on the grid to win and prevent one's opponents from doing the same. ***Ice Cream Factory.*** Two teams compete to complete ice cream orders as quickly as possible and win coins. The team with the most coins at the end of the time wins.	
1 to 1	
Hit the beat.* In this game, participants must hit targets that appear at the right time to the rhythm of the music.	

FIG. 2. Description of games used.

*As ''Hit the Beat'' is played by two players, the other two participants perform a muscle-strengthening exercise: sit–stand on a chair while throwing a ball. In pairs, facing each other, the subjects must standup, make a pass, and sit down again in a coordinated manner. The objective is to make as many passes as possible in 30 seconds. The exercise is performed twice.

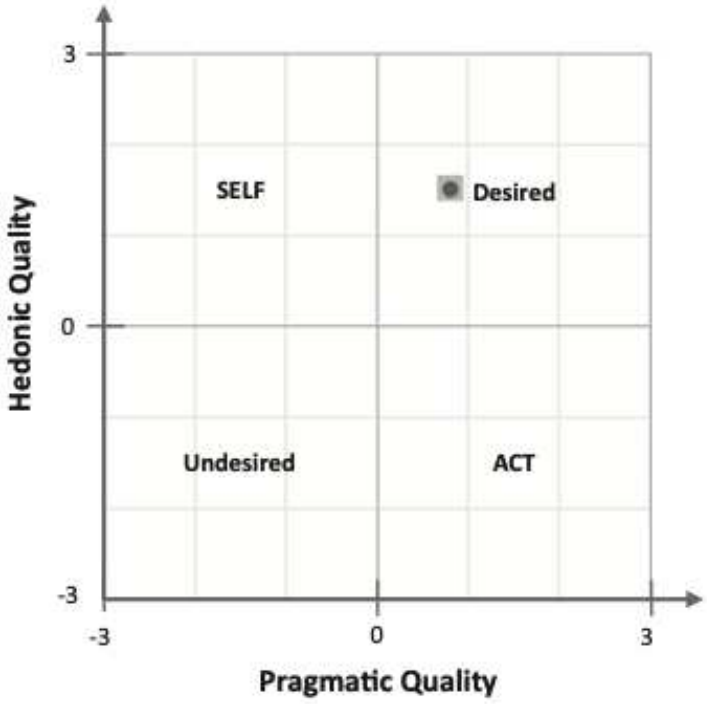


FIG. 3. Neo One character, emerging from specific combinations of pragmatic and hedonic attributes.

Translated from Hassenzahl's model.[25]

●AttrakDiff2 score. ACT, product with strong pragmatic qualities and weak hedonic qualities; SELF, product with weak pragmatic qualities and strong hedonic qualities.

Table 1. Scores of Perceived Enjoyment, Mental Load, and Physical Intensity

	Mean	*SD*
Perceived enjoyment (score)	60.71	6.04
RTLX (score)	53.46	14.28
Mental demand (score)	63.16	25.80
Physical demand (score)	62.37	26.65
Temporal demand (score)	64.47	23.79
Effort (score)	57.63	22.50
Performance (score)	39.74	16.52
Frustration (score)	33.42	23.11
Modified Borg scale (score)	4.37	1.55
Mean intensity (percent of TMHR)	69.64	9.11

RTLX, "Raw" Task Load Index; TMHR, theoretical maximal heart rate.

Table 2. Comparison of scores with standard value of 1

	Mean	*SD*	*df*	t	P	d
Pragmatic quality	0.91	0.89	1	0.65	0.52	–0.10
Hedonic quality stimulation	1.68	0.81	1	5.18	**<0.001**	0.84
Hedonic quality identification	1.32	0.69	1	2.90	**<0.01**	0.47
Total attractiveness	2.08	0.79	1	8.44	**<0.001**	1.37

Bold values are significant.

Table 3. Correlations Between Total Attractiveness, Perceived Enjoyment, Workload, and Intensity

Variables		*Total attractiveness*	*Perceived enjoyment*	*Workload*	*Modified Borg*
Total attractiveness (score)	Pearson's *r*	—			
	P	—			
Perceived enjoyment (score)	Pearson's *r*	**0.50**	—		
	P	**<0.001**	—		
Workload (score)	Pearson's *r*	**−0.34**	0.12	—	
	P	**<0.05**	0.46	—	
Modified Borg (score)	Pearson's *r*	**−0.36**	0.06	**0.51**	—
	P	**<0.05**	0.73	**<0.001**	—
Mean intensity (percent of TMHR)	Pearson's *r*	0.10	0.18	0.17	–0.21
	P	0.56	0.29	0.30	0.21

Annexe 10. Deuxième article relatif à l'étude 3 publié dans JMIR Serious Games

Original Paper

Active Video Games Training for Older Adults: Comparative Study of User Experience, Workload, Pleasure, and Intensity

Néva Béraud-Peigné[1,2], BSc, MSc; Alexandra Perrot[1], BSc, MSc, PhD; Pauline Maillot[2], BSc, MSc, PhD

[1]Université Paris Saclay, Complexité, Innovation et Activités Motrices et Sportives, Bures-sur-Yvette, France
[2]Université Paris Cité, Institut des Sciences du Sport-Santé de Paris, Paris, France

Corresponding Author:

Néva Béraud-Peigné, BSc, MSc
Université Paris Saclay, Complexité, Innovation et Activités Motrices et Sportives
335, rue Pierre de Coubertin
Bures-sur-Yvette, 91440
France
Phone: 33 0658936450
Email: neva.beraud-peigne@universite-paris-saclay.fr

Abstract

Background: Given the appeal of active video games (AVG), many tools are now being used for combined training in older adults. However, there is a lack of comparative data to determine which type of AVG is better suited to older adults.

Objective: The purpose of this study was to compare user experience (UX), workload, pleasure, and intensity of three different experiences: (1) an Immersive and Interactive Wall Exergame (I2WE), (2) a consumer device (SWITCH), and (3) a combination of video games and physical stimulation (biking and videogaming, BIKE-VG) for older adults. I2WE and SWITCH are categorized as Moving While Thinking training, meaning that the cognitive task is integrated into the motor or physical task. In contrast, BIKE-VG is categorized as Thinking While Moving training, where the cognitive and motor or physical tasks are not interconnected. The nature of the cognitive, physical, and motor combinations also differentiates them. I2WE is multi-domain training, while BIKE-VG is physical-cognitive training, and SWITCH is motor-cognitive training.

Methods: A total of 90 older adults (mean [SD] 69.49 [5.78]) were divided into 3 groups (I2WE, SWITCH, and BIKE-VG). Each participant completed a 45-minute group session and then filled out questionnaires to evaluate UX, workload, pleasure, and intensity.

Results: The UX was positive for I2WE and SWITCH, and neutral for BIKE-VG. It was higher for I2WE than for BIKE-VG (t_{87}=2.83; P=.02; d=0.70; 95% CI 0.15-1.69). The workload was moderate across all 3 groups. The intensity was moderate for all groups, ranging between 50% and 70% of the maximum heart rate, and approached high intensity for the I2WE and SWITCH groups. It was significantly higher for I2WE than for BIKE-VG (t_{66}= 2.86; P=.01; d=0.70; 95% CI 1.04-11.43). The perceived pleasure was significantly higher for I2WE (t_{87}=3.63; P=.001; d=0.9;95% CI 2.74-13.23) and SWITCH (t_{87}=3.11; P=.01; d=0.87; 95% CI 1.82-13.69) compared with BIKE-VG.

Conclusions: The UX and perceived enjoyment are higher for the Moving While Thinking training compared with the Thinking While Moving training. This indicates that the I2WE and SWITCH training approaches are promising and motivating options for combined training for older adults.

JMIR Serious Games 2025;13:e67314; doi: 10.2196/67314

Keywords: combined training; experience; video game; older adult; elderly; user experience; AVG; UX; physical stimulation; exergame; exergaming; game; gamification; motor; physical; physical activity

Introduction

The interest in training with active video games (AVG) for older adults has been growing over the past few decades [1-2]. AVG are good opportunities to combine cognitive and physical (or motor) stimulation. Moreover, they could increase healthy lifestyle adoption [3], counteract sedentary lifestyles, and enhance individual health behavior, as technology programs provide more enjoyment than traditional interventions [4]. Given the appeal of AVG, many tools are beginning to be used for training, including consumer devices (eg, Xbox, Wii, Switch, and Kinect). The Nintendo

Wii, released in 2006, was one of the first consumer devices and was later replaced by the Nintendo Switch (Nintendo Co) in 2017. The Nintendo Wii or Switch console has a wireless handheld pointing device with embedded sensors that detect direction, speed, and acceleration changes in three dimensions. The games offer immediate visual and auditory performance feedback and progress information. More specifically, the cognitive task is incorporated into the motor task by the Moving While Thinking approach [5]. Thus, the 2 tasks are linked and interactive, which could benefit older adults' cognitive functions since it can increase the synergistic effect of the combined training tenfold [6]. This consumer device allows collective interactions with cooperative and opposition games. In the 2020s, a new type console was developed. These Exergames are assisted by an Immersive and Interactive Wall (I2WE), such as LUMOplay (Lumo Interactive), Play Lü (Lü Interactive Playground) [7], iWall (CSE Entertainment) [8], ExerCube (Sphery AG) [9,10] and Neo One (NeoXperiences) [11,12]. In comparison with consumer devices, I2WE is more extensive and more immersive. I2WE creates simultaneous multi-domain training, with complete physical stimulation (ie, aerobic, muscle strengthening), motor stimulation (complex motor skills), and freedom of movement, in addition to a virtual continuous cognitive stimulation. These characteristics could produce more well-rounded and intensive training than consumer devices.

Other experiences were created with a combination of physical exercise (eg, cycling, kayaking) and virtual stimulation (eg, video games, interactive maps) [13-15]. Cognitive stimulation is sometimes linked (Moving While Thinking, eg, cycling with an interactive map), but other times, they are not (Thinking While Moving, eg, cycling with unrelated video games).

Alongside developing these various tools, many studies have been undertaken to measure their health effects on older adults, including physical [1,16], dual-task [12], cognitive [2,17], and social benefits [18]. However, the positive impacts of AVG on individual cognitive domains are inconsistent across studies [19]. This may result from devices' varying forms and definitions of AVG's physical and cognitive demands. Indeed, AVG could generate different solicitations like physical-cognitive training, motor-cognitive training, and multi-domain training [20]. Torre and Temprado [20] described physical-cognitive training as the sequential or simultaneous combination of endurance (aerobic) and muscular resistance exercises with cognitive tasks. Motor-cognitive training, on the other hand, involves pairing complex motor skills training with cognitive tasks that are typically added separately from the motor task. However, we propose that motor-cognitive training can also involve simultaneous motor and cognitive stimulation (eg, consumer device like Nintendo Switch). Multi-domain training integrates aerobic exercises and muscular resistance, complex motor skills, and cognitive tasks. Moreover, the interaction, immersion, controller (ie, body controller, object controller, button controller, mixed button, and gesture controller), and games may differ. As Li et al [18] recommended in their systematic review, more studies are needed to compare the effects of different exergaming platforms. Herold et al [21] indicated that future studies should directly compare the effectiveness of various digital and home-based physical training interventions.

It is highly recommended that AVG for public health and disease prevention be designed to meet the expectations and needs of its target users [22]. Before conducting full-scale studies, Campbell [23] indicated that the acceptability and feasibility should be tested with older adults. The workload must be appropriate to provide sufficient stimulation without causing excessive stress. The same goes for the intensity, which should be moderate according to recommendations [19]. More specifically, to make AVG appealing to older adults, it needs to be designed to encourage initial acceptance and sustained use over time. This requires a user-centered design approach, including thoroughly evaluating the exergames' user experience (UX) [24]. UX, which results from the interaction between the user, the system, and the context, is crucial in ensuring high-quality user-system interaction. Consequently, UX is increasingly used to assess AVG for the elderly [24-27]. The concept of UX builds upon the foundations of usability, which alone are now seen as inadequate for predicting and explaining technology acceptance. UX expands usability by incorporating emotional, subjective, and temporal dimensions, defining an individual's technology interaction. These aspects are crucial for designing suitable interactive systems. Hassenzahl [28] uses a pragmatic–hedonic model of UX, in which individuals perceive the quality of their interactions with products according to two types of attributes: pragmatic qualities, directly related to task accomplishment and product use, and hedonic qualities, which emphasize the psychological well-being of individuals. These 2 attributes combine to generate a global evaluation of product attractiveness. In actual studies that evaluated active video game UX among older adults, UX is positive [29,30]. Perceived enjoyment is also often evaluated to complete the UX assessment [31-33]. More enjoyable AVG can lead to more intense activity [34,35].

Numerous studies have been conducted on AVG involving older adults, but few focus on comparing different experiences with each other. Studies have mainly focused on single gaming platforms or compared 2 modes with short game exposures [26] or have lacked participants [30].

Studies agree that AVG creates positive training experiences. However, there is a lack of comparative information to determine whether one type of AVG would be more beneficial than others. The context of this study was primarily focused on a preventive approach, aimed at reducing the risk of physical and cognitive decline associated with aging. The goal was to explore how innovative strategies, such as the use of active video games, could be used as a primary prevention strategy to preserve cognitive function before the onset of impairments. The purpose of this study was to compare three different experiences: (1) I2WE, (2) consumer device (SWITCH), and (3) a combination of video games and physical stimulation (biking and gaming, BIKE-VG).

We expected the 3 AVG training sessions create a physical intensity in line with the recommendations for older adults (moderate to high), with a correct session workload and a positive UX. We hypothesized that I2WE and SWITCH would generate a greater UX and intensity than BIKE-BG. Moreover, a higher workload was expected for the Thinking While Moving training (ie, BIKE-VG) compared to the 2 Moving While Thinking trainings (ie, I2WE, SWITCH).

Methods

Ethical Considerations

This study was approved by the Ethics and Research Committee of Université Paris-Saclay (CER-Paris-Saclay-2023-084). Informed consent was obtained from all participants prior to their inclusion in the study. Participants were clearly informed of their right to withdraw from the study at any time without consequence. All data collected during the study were fully anonymized. No financial compensation was provided to participants for their involvement in the study.

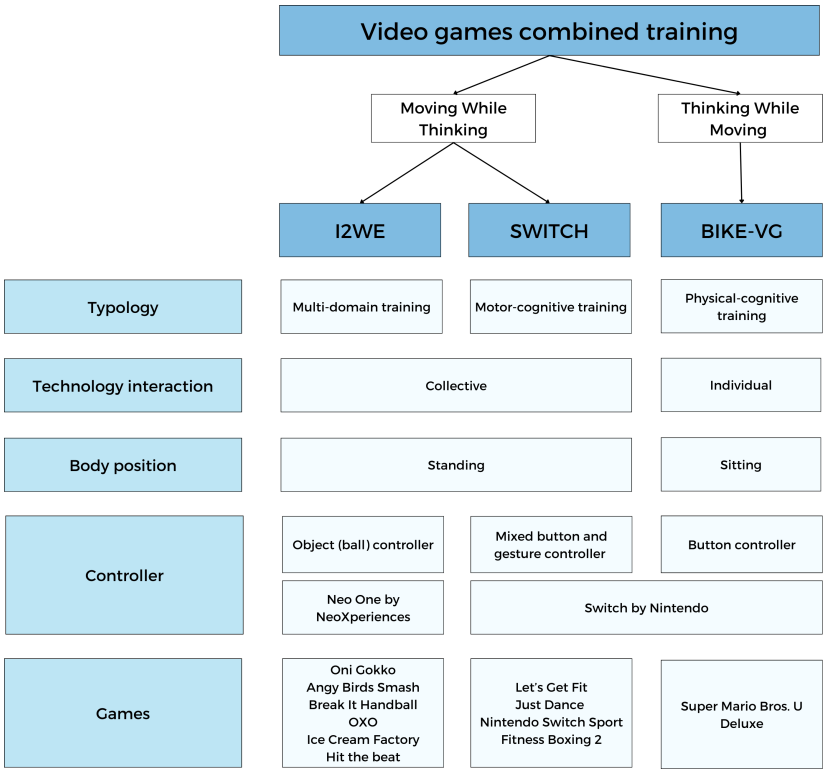
Recruitment

Potential participants responded positively to a call for participation by email or flyer distributed at associations and clubs in Ile-de-France (France). A power analysis using the G*Power version 3.1.9.7 (Heinrich-Heine-University), based on the primary statistical test planned for this study (ANOVA: Fixed effects, omnibus, one-way), revealed that a sample size of 66 participants was needed (α=.05; power=0.80; effect size: f=0.40). All participants met the following criteria: (1) be over 60 years of age, (2) score three or higher on a subjective health scale (1=verypoor-5=excellent), (3) have no major pathology, and (4) have normal or corrected vision and hearing.

Protocol

Participants were split into 3 groups (ie, I2WE, SWITCH, and BIKE-VG). The characteristics (ie, physical/motor stimulation, interaction, body position, controller, and games) are described in Figure 1.

Figure 1. Description of the 3 video games combined training Notes. Three types of video game combined training were compared: (A) Immersive and Interactive Wall Exergame, (B) SWITCH games, and (C) Bike-based Video Games group. I2WE and SWITCH were classified as Moving While Thinking training, meaning that the cognitive task is integrated into the motor/physical task. BIKE-VG was considered Thinking While Moving training, where the cognitive and motor/physical tasks were not interconnected [5]. To define the different types of combined training, we followed the modified definition by Torre and Temprado [20]. I2WE was categorized as multi-domain training (integrates aerobic and muscular resistance exercises, complex motor skills, and cognitive tasks). SWITCH was a motor-cognitive training that paired complex motor skills training with cognitive tasks. BIKE-VG was defined as physical-cognitive training, which involved the combination of endurance and muscular resistance training with cognitive tasks.



For each group, the protocol was the same: the participants were divided into groups of four participants per session (45 min) and then filled in a battery of questionnaires. The session was always preceded by ten minutes of exercises, during which the participants gradually warmed up (joint mobilization – eg, turning the head, shoulders, and ankles – walking around the room at various paces, and squat movements). A sports therapist supervised the session. The supervisor ensured participants' safety by monitoring correct posture. For I2WE and SWITCH, the breaks between the games lasted a few seconds, just enough time to switch to the next game.

I2WE Group

A Neo One device was used (Figure 2A), an I2WE equipped with a video projector and infrared sensors that allow playing without headphones or equipment, so the body controls games. Neo One was conducted standing, offering multi-domain training with collective interactions (ie, cooperation, opposition) between players (multiplayer). Neo One has about 20 games, including sports and puzzle games, that can be played in cooperation or opposition. For this study, the session was composed of 6 games of 5 minutes. The instructions and rules of the games were displayed on the screen and re-explained by the supervisor if necessary. The first 3 games were cooperative, while the next 2 were competitive (2 vs 2). The final game was also competitive but played 1 versus 1.

Figure 2. Photography of each group (A) Immersive and Interactive Wall Exergames, (B) SWITCH games, (C) Bike-based Video Games group .

Oni Gokko

Participants had to complete several mini games, including Hangman, Hidden Object, Memory, and Word Scramble. The goal was to score as many points as possible.

Angry Birds Smash

In this game, players had to destroy as many fortresses and pigs on the screen as possible to progress through levels. The objective was to complete the levels and achieve the highest score within the allotted time.

Break It Handball

In this game, players aimed at various bricks displayed on the screen to advance through levels. The objective was to complete the levels and achieve the highest score within the time limit.

OXO

This puzzle game was based on the mechanics of tic-tac-toe. The goal was to align three symbols on the grid to win.

Ice Cream Factory

In this game, 2 teams competed to fulfill ice cream orders as quickly as possible and earned coins. The team with the most coins at the end of the time won.

Hit the Beat

In this game, participants had to hit targets at the right moment as they appeared in rhythm with the music.

SWITCH Group

The Nintendo Switch device was a motion-sensitive controller to detect three dimensions (Figure 2B). It was an exergame connected with a 35-inch screen. The controller has mixed buttons and gestures. Exergames were conducted standing, offering motor-cognitive solicitation, with collective interactions (ie, cooperation and opposition) – multiplayer. A total of 5 games of 5-7 minutes were used. For the first two games, participants played all 4 together. For the last three games, participants were separated into 2 groups of two but played simultaneously.

Let's Get Fit

This game consisted of following the movements of an avatar and performing sports movements (eg, high knees, heel kicks, and squats).

Just Dance

The players followed dance choreographies on screen by mimicking the movements of virtual dancers as best as possible. Around 2 pieces of music were played: "*Rain Over Me" and "Le Bal Masqué*."

Football on Nintendo Switch Sport

In this game, 2 participants competed against each other. The aim was to score more goals than their opponent. Each participant moved their avatar with the Joy-Stick and shot the ball with a Joy-Con placed on their leg.

Badminton on Nintendo Switch Sport

In this game, 2 players competed against each other. The game used motion controls and button inputs to simulate swings and shots. The aim was to score more points than their opponent.

Fitness Boxing 2

It combined boxing-inspired workouts with music and rhythm gameplay elements. Players used the Joy-Con controllers to simulate a series of boxing movements (ie, forehand, hook, uppercut) in time with the music and on-screen prompts.

BIKE-VG Group

Participants had to play the *Super Mario Bros.U Deluxe* game on the Nintendo Switch while pedaling on a stationary bike (Ultra Green R 2.0 by MOOVYOO), offering physical-cognitive training (Figure 2C). Each participant played individually (single-player). Joy-Con controllers were attached to the console in the participant's hands, so the controller was only by button. The game involved navigating through side-scrolling levels filled with enemies, obstacles, and secrets. After explaining how to use the game console and the game instructions, a 5-minute warm-up at minimum resistance was performed on the bike. Next, participants had to pedal and play for 40 minutes, with resistance incrementing every 3 minutes to a minimum level of 4. If participants wanted to put on more resistance, they were free to do so.

Outcomes

Heart Rate

The participant's heart rate was continuously monitored throughout the session with a Polar Verity Sense heart rate monitor. Theoretical Maximum Heart Rate (TMHR) was determined using the formula developed by Gellish and colleagues [36]: TMHR =192-0.007x age^2. The subsequent calculation defines the average intensity experienced by the individual during the session: average intensity = (average heart rate x 100) / TMHR.

Questionnaires

QAPPA (in French : Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Agées – in English: Physical Activity Questionnaire for Older Adults) [37] was a questionnaire developed to assess weekly physical activity levels, tailored specifically for older adults.

AttrakDiff 2 [38] which assessed user experience (UX), was translated and validated in French [39]. The questionnaire items were categorized into four scales: (1) Pragmatic Qualities, which evaluated usability and perceived ease of use; (2) Hedonic Quality – Stimulation, which assessed the support for stimulation with new, attractive, and stimulating content, features, and interaction styles; (3) Hedonic Quality – Identity, which evaluated the support for social function and communication of user identity; and (4) Overall Attractiveness, which gauged the overall perceived value of the product based on its pragmatic and hedonic qualities. For each scale, the score ranges from –3 (low score) and 3 (high score).

NASA-Task Load index (NASA-TLX) [40] assessed the workload associated with tasks. Participants rated six dimensions of workload (ie, mental demand, physical demand, time pressure, performance, effort, and frustration) on a scale from 0 to 100. Due to the multidimensional nature of NASA-TLX, some dimensions may contribute more importantly to the total score, prompting weighting procedures to assign coefficients to each dimension. However, these procedures were criticized for being time-consuming [41]. Alternatively, Bittner et al [42] proposed a more straightforward approach by averaging the scores across all six dimensions, termed the "Raw" Task Load Index (RTLX). They demonstrated a high correlation between the RTLX and the traditional calculated score. Cegarra and Morgado [43] confirmed this finding with the French version of the scale.

The physical activity enjoyment scale [44], consisting of ten items translated and validated in French [45] on a scale ranging from 7 to 70 (best score) assessed the perceived enjoyment experienced during physical exercise.

The modified Borg Scale [46] gauged perceived exertion during exercise. It used a numerical scale ranging from 0 to 10, with corresponding verbal anchors (eg, very light, difficult, painful effort) to help individuals rated their exertion level.

Want to Continue to Play Active Video Games

Participants were asked if they would like to continue playing AVG in the future (strongly agreed, agreed, don't know, disagreed, strongly disagreed).

Statistical Analysis

The analyses were performed using JASP software (0.18.3 version). Descriptive data (ie, mean, SD) were reported for all variables. Personal variables group differences were compared with a one-way analysis of variance (ANOVA) for continuous variables (ie, age, BMI, QAPPA) and χ^2 test for categorical variables (ie, sex, educational level, active video games practice). To determine if the UX for each AVG was

positive, a one-sample Student *t* test was used to compare the mean of each sample to a reference value. ANOVAs were employed to compare perceived enjoyment, session workload, physical intensity, and UX between groups. 95% CI completed them for the mean difference. All statistical analyses with a *P* value <.05 were considered significant. A Tukey Post Hoc test was realized when a significant interaction was found. Effect Sizes were calculated to study the power of the results: Eta-Squared (η^2) for ANOVA and Cohen *d* for *t* test. As indicated in the effect size guidelines from Cohen [47], η^2 is considered low if the effect size is between 0.01 and 0.06, medium if it is between 0.06 and 0.14, and large if it is superior to 0.14. Cohen *d* is considered low if the effect size is between 0.20 and 0.50, medium between 0.50 and 0.80, and large if superior to 0.80.

Results

Overview

Personal information for each group is given in Table 1. There were no significant differences for all variables.

Table 1. Personal variables.

Personal variables	Switch (n=23)	I2WE[a] (n=38)	Bike-vg[b] (n=29)	*P* value
Age (years), mean (SD)	69.39 (6.42)	68.26 (5.53)	71.17 (5.34)	.12
BMI (score)	25.09 (4.94)	24.08 (3.33)	24.45 (2.59)	.57
QAPPA[c] (n)	877.39 (712.01)	1008.95 (683.62)	857.93 (705.43)	.63
Sex, n (%)				.58
Male	4 (17.39)	9 (23.68)	4 (13.79)	
Female	19 (82.61)	29 (76.32)	25 (86.21)	
Level of education, n (%)				.10
No diploma	0 (0)	4 (10.53)	0 (0)	
Certificate	2 (8.7)	5 (13.16)	1 (3.45)	
Vocational certificate	7 (30.43)	12 (31.58)	3 (10.34)	
High school diploma	2 (8.7)	1 (2.63)	3 (10.34)	
Associate's degree	4 (17.39)	8 (21.05)	5 (17.24)	
Bachelor's degree	4 (17.39)	7 (18.42)	8 (27.59)	
Master's degree	4 (17.39)	1 (2.63)	7 (24.14)	
Doctorate degree	0 (0)	0 (0)	2 (6.9)	
Active video games practice (%)				.74
More than one a week	0 (0)	0 (0)	0 (0)	
Between once a week and once a month	0 (0)	1 (2.63)	0 (0)	
Between one a month and once a year	3 (13.04)	4 (10.53)	2 (6.90)	
Never	20 (86.96)	33 (86,84)	27 (93.10)	

[a]I2WE: Immersive and Interactive Wall Exergame
[b]BIKE-VG: Bike-based Video Game group
[c]QAPPA: Questionnaire d'Activité Physique Pour les Personnes Âgées (Physical Activity Questionnaire for Older Adults)

User Experience

The UX, depending on the group, are given in Figure 3.

Figure 3. User experience depending on groups.

Comparison at the Threshold

The area of positivity of the AttrakDiff2 items is between 1 and 3, neutrality between −1 and 1, and negativity between −1 and −3. To know if the scores were significantly positive, a *t* test was performed to compare the averages for the four AttrakDiff2 items with a value of 1 for each group (Table 2).

Table 2. Score difference from standard 1.

Score	Mean (SD)	*t* test	*P* value	*d*
I2WE[a]				
Pragmatic quality (score)	0.91 (0.89)	0.65	.52	0.10
Hedonic quality stimulation (score)	1.68 (0.81)	5.18	<.001	0.84
Hedonic quality identity(score)	1.32 (0.69)	2.90	.01	0.47
Total attractiveness (score)	2.08 (0.79)	8.44	<.001	1.37
SWITCH				
Pragmatic quality (score)	0.96 (0.79)	0.22	.82	0.05
Hedonic quality stimulation (score)	1.53 (1.01)	2.49	.02	0.52
Hedonic quality identity (score)	0.91 (0.89)	0.47	.65	0.10
Total attractiveness (score)	1.93 (1.17)	3.78	.001	0.79
BIKE-VG[b]				
Pragmatic quality (score)	0.23 (1.09)	3.79	<.001	0.70
Hedonic quality stimulation (score)	1.26 (0.92)	1.52	.14	0.28
Hedonic quality identity (score)	0.40 (1.22)	2.66	.01	0.49
Total attractiveness (score)	1.16 (1.85)	0.47	.64	0.09

[a]I2WE: Immersive and Interactive Wall Exergame
[b]BIKE-VG: Bike-based Video Game group

The Pragmatic Quality is significantly smaller than 1 for BIKE-VG (t_{28}=3.79; P<.001; d=0.70). There was no significant difference to 1 for I2WE and SWITCH.

The Hedonic Quality - Stimulation is significantly greater than 1 for I2WE (t_{37}=5.18; P<.001; d=0.84) and SWITCH (t_{22}=2.49; P=.02; d=0.52).

The Hedonic Quality - Identity is significantly greater than 1 for I2WE (t_{37}=2.90; P=.01; d=0.47) and significantly lesser than 1 for BIKE-VG (t_{28}=2.66; P=.01; d=0.49).

The Total Attractiveness is significantly greater than 1 for I2WE (t_{37}=8.44; P<.001; d=1.37) and SWITCH (t_{22}=3.78; P=.001; d=0.79).

Comparison Between Groups

ANOVA analysis revealed a significant group effect for three items: Pragmatic Quality ($F_{2,87}$=5.45; P=.01; η^2=.11), Hedonic Quality Identity ($F_{2,87}$=780; P<.001; η^2=0.16), and Total Attractiveness ($F_{2,87}$=4.31; P=.02; η^2=.09). Post Hoc analysis indicated that for Pragmatic Quality, the score is significantly better for SWITCH than BIKE-VG (t_{87}=2.79; P=.02; d=0.78; 95% CI 0.11-1.36), and for I2WE than BIKE-VG (t_{87}=2.92; P=.01; d=0.72; 95% CI 0.12-1.23); for Hedonic Quality Identity, the score is significantly better for I2WE than BIKE-VG (t_{87}=4; P<.001; d=0.99; 95% CI 0.37-1.48) and for Total Attractiveness, the score is signif-

icantly better for I2WE than BIKE-VG (t_{87}=2.83; P=.02; d=0.70; 95% CI 0.15-1.69).

Scores on the physical activity enjoyment scale, the RTLX, the modified Borg scale, and the intensity of the session are provided in Table 3.

Table 3. Perceived enjoyment scores, workload, physical intensities.

Score	SWITCH	I2WE[a]	BIKE-VG[b]	P value	η^2
Perceived Enjoyment (score)	60.48 (8.93)	60.71 (6.04)	52.72 (11.67)	**<.001**	**.15**[c]
RTLX[d] (score)	54.46 (18.54)	53.46 (14.28)	59.14 (16.36)	.34	.02
Mental demand (score)	62.39 (23.25)	63.16 (25.8)	75.00 (18.03)	.07	.06
Physical demand (score)	60.65 (23.47)	62.37 (26.65)	51.72 (29.74)	.25	.03
Temporal demand (score)	63.26 (24.24)	64.47 (23.79)	61.72 (23.19)	.90	.00
Effort (score)	56.96 (22.50)	57.63 (22.5)	57.07 (23.59)	.99	.00
Performance (score)	44.78 (24.47)	39.74 (16.52)	54.66 (25.46)	**.03**	**.08**
Frustration (score)	38.70 (31.7)	33.42 (23.11)	54.66 (27.48)	**.01**	**.11**
Modified Borg Scale (score)	3.83 (1.11)	4.37 (1.55)	3.45 (1.11)	**.03**	**.08**
Mean Intensity (percent of TMHR)[e]	68.01 (8.2)	69.64 (9.11)	63.41 (8.95)	**.02**	**.09**

[a]I2WE: Immersive and Interactive Wall Exergame
[b]BIKE-VG: Bike-based Video Game group
[c]Bold values are significant.
[d]RTLX: ''Raw'' Task Load Index
[e]TMHR: theoretical maximal heart rate

Perceived Enjoyment

There was a significant group effect ($F_{2,87}$=7.71, P<.001, η^2=.15) for *Perceived Enjoyment*. Post Hoc analysis revealed a significant difference between I2WE and BIKE-VG (t_{87}=3.63, P=.001, d=0.90, 95% CI 2.74-13.23) and between SWITCH and BIKE-VG (t_{87}=3.11, P=.01, d=0.87, 95% CI 1.82-13.69).

Session's Workload

The session's workload, evaluated by the RTLX, was correct for the three groups. The three dimensions related to the task (ie, mental demand, physical demand, and temporal demand) were balanced, while frustration was the lowest dimension, except for BIKE-VG, where the frustration was higher. There was a significant group effect ($F_{2,87}$=5.30; P=.01; η^2=.11), and the post hoc test revealed a significant difference between I2WE and BIKE-VG (t_{87}=3.20; P=.01; d=0.79; 95% CI 5.41-37.06).

There was also a significant group effect ($F_{2,87}$=3.88; P=.03; η^2=.08) for performance. The post hoc test indicated a significant difference between I2WE and BIKE-VG (t_{87}=2.77; P=.02; d=0.68; 95% CI 2.09-27.75).

Physical Intensity

The objective physical intensity was moderated for the three groups, but there was a significant group effect ($F_{2,87}$=4.22; P=.02; η^2=.09) for mean intensity. The post hoc test showed a significant difference between I2WE and BIKE-VG (t_{87} = 2.86; P=.01; d=0.70; 95% CI 1.04-11.43)

The intensity was perceived between very easy and easy for SWITCH (M=3.93) and BIKE-VG (M=3.45) and between easy and moderate for I2WE (M=4.37). There was a significant group effect for subjective intensity ($F_{2,87}$=3.58; P=.03; η^2=.08). I2WE was significantly greater than BIKE-VG (t_{87}=2.64; P=.03; d=0.65;95% CI 0.09-1.75).

Want to Continue to Play Active Video Games

In all 3 groups, most participants wanted to continue: 84% (32 out of 38 for I2WE; 58% completely agreed, 26% agreed), and 65% for SWITCH (15 out of 23; 43% completely agreed, 22% agreed). However, these figures were lower for BIKE-VG with 59% (17 out of 29; 21% completely agreed, 38% agreed). A nonnegligible proportion disagreed (17%) or completely disagreed (14%).

Discussion

Principal Findings and Comparison With Previous Works

This study aimed to compare three AVG experiences (I2WE, SWITCH, BIKE-VG) on older adults. Concerning UX, the overall attractiveness, which is the total perceived value of the product based on the perception of its pragmatic and hedonic qualities, was positive for I2WE and SWITCH. Games-based programs could offer an enjoyable and stimulating exercise experience [4]. AVG provide instant visual and auditive feedback, motivational messages such as bonuses, or encouraging comments that make the activity entertaining and interactive [48]. However, the overall attractiveness was not positive for the three experiences, given that it was neutral for BIKE-VG, with a significant difference between I2WE and BIKE-VG. According to Lallemand and Gronier [49], the neutral zone indicates that the product fulfills its purpose without causing any negative impact. The difference between the two other groups may be explained by the combination

of physical and cognitive stimulation, which is less natural for BIKE-VG than for I2WE and SWITCH: the physical task (ie, cycling) is not directly linked to the cognitive task (ie, video games). Exercises involving Thinking While Moving may be less instinctive and ecological. In contrast, I2WE and SWITCH involved Moving While Thinking tasks: the cognitive task was incorporated into the physical tasks. Moving While Thinking training may be easier, especially since this was the first experience with AVG for most participants in this study. Although there was no significant difference between the groups, this could explain why the BIKE-VG program, a Thinking While Moving program, had a high cognitive scale score on the workload scale (75/100) compared with the other two Moving While Thinking training programs, with 62.39/100 for the SWITCH group and 63.16/100 for the I2WE group. The difference in overall attractiveness may also be partially attributed to the variation in interaction on with other participants: BIKE-VG used single-player game, while SWITCH and I2WE involved multiplayer games.

Moreover, the controller may be the origin of this dissimilarity, reflected by differences in the Pragmatic Quality scores. Its evaluation represents users' perceived ability to use products that allow them to manipulate the environment to accomplish their objectives. The Pragmatic Quality score was neutral for the three groups; however, the score was significantly lower for BIKE-VG than for I2WE and SWITCH groups. A button controller may be more complex to use than another controller (ballon controller or mixed button and gesture controller) and need more learning effort [50]. This may be creating an alteration of the experience. In their study, Pham and Theng [50] found that the older participants preferred to play games with fewer or no controlling devices. The Gesture Controller (Kinect), which was reported to require much physical movement, scored the highest in overall attractiveness, while participants gave negative feedback to the button controller, which requires fewer body movements. A difficulty in using the buttons can explain lower score for the BIKE-VG group and can, therefore, generate more frustration and worse performance than the body or mixed button and gesture controller. Indeed, the BIKE-VG group had a higher frustration score at NASA-TLX than the I2WE group. Moreover, it was the same for performance. However, the global workload score was correct for the three groups, with no significant difference between the three groups.

AVG promise to reduce loneliness, increase social connection, and foster positive attitudes toward others [18]. However, AVG may also provide opportunities for social engagement with peers and family members [48]. In this study, this is reflected by the positive score of the I2WE groups for the Hedonic Quality Identity score, which is the capacity to support a social function and communicate a specific user identity. This AVG provides a lot of communication and interaction between players. The BIKE-VG group, where the participants played alone (single-player), obtained a neutral score significantly lower from I2WE (multiplayer). Moreover, SWITCH and I2WE supported the need for stimulation with new, attractive, and stimulating content, features, and interaction styles, given that the two groups had positive scores at Hedonic Quality Stimulation. The score was neutral for BIKE-VG, but no significant difference existed between the groups. It is possible that the BIKE-VG session was too monotonous because it contained only one game, compared to SWITCH and I2WE, which included several games.

The intensity was moderated for the three groups, between 50% and 70% of the maximum heart rate, and almost high intensity for the I2WE and SWITCH groups. This is in line with the ACSM recommendations. Therefore, these three AVG could be used in a training program to improve physical and cognitive abilities. However, the physical intensity was significantly greater for I2WE than for BIKE-VG. The physical solicitation of I2WE may explain this difference: the whole-body multi-domain training and the freedom of movement offered by the system may increase intensity, as Martin-Niedecken showed with the ExerCube [9]. Moreover, Moving While Thinking training may increase intensity when two tasks are linked (there is no task prioritization). Subjectively, the intensity was considered very easy for SWITCH and BIKE-VG and easy to moderate for I2WE, with a significant difference between I2WE and BIKE-VG. The physical stimulation, which was intermittent for I2WE and SWITCH and continuous for BIKE-VG, may explain these differences.

As indicated in many studies [27,33,51,52] and the present work, the pleasure generated by AVG is high. However, it was significantly higher for I2WE and SWITCH than BIKE-VG. Some AVG create more enjoyment than others, depending on the features of the interfaces and the interactions between players. Indeed, as noted by Caserman et al [53], social interaction, one of the many quality criteria required for a game, plays an important role in enhancing enjoyment. Concerning the interface, Kim et al [35] showed that the level of interface embodiment influences the level of enjoyment on young adults (mean age =24.39). They compared three levels of interface embodiment (low, medium, and high), finding that the high level provided significantly more enjoyment than the other two.

The individual characteristics of participants may influence each user's experience. In this study, no differences were found between age, BMI, physical activity level, gender, education level, and previous experience with active video games. Although most participants (82%-90% depending on the group) had never played active video games, players' preferences and profiles may still affect UX, enjoyment, or physical intensity.

According to our knowledge, this study was the first to compare three AVG experiences in older adults. Thus, the comparison with the literature is thin. For example, studies often compare only 2 devices [54], or sometimes 3, but with sessions lasting a few minutes [26] that do not reflect a complete session.

Conclusion

In light of the present study, Moving While Thinking training (eg, I2WE, SWITCH) appears promising for stimulating physical, cognitive, and dual-task capacities in older adults. An interventional approach is needed to compare the effects of these programs to Thinking While Moving programs (eg, BIKE-VG).

Data Availability

Deidentified data that support the findings of this study are available on request from NBP.

Authors' Contributions

NBP performed data curation, formal analysis, investigation, and methodology. NBP, AP, and PM performed project administration. NBP, AP, and PM wrote the original draft and performed review and editing. AP and PM performed supervision.

Conflicts of Interest

None declared.

References

1. Deng N, Soh KG, Abdullah BB, et al. Active video games for improving health-related physical fitness in older adults: a systematic review and meta-analysis. Front Public Health. 2024;12:1345244. [doi: 10.3389/fpubh.2024.1345244] [Medline: 38694976]
2. Soares VN, Yoshida HM, Magna TS, et al. Comparison of exergames versus conventional exercises on the cognitive skills of older adults: a systematic review with meta-analysis. Arch Gerontol Geriatr. 2021;97:104485. [doi: 10.1016/j.archger.2021.104485] [Medline: 34293715]
3. DeSmet A, Van Ryckeghem D, Compernolle S, et al. A meta-analysis of serious digital games for healthy lifestyle promotion. Prev Med. Dec 2014;69:95-107. [doi: 10.1016/j.ypmed.2014.08.026] [Medline: 25172024]
4. Valenzuela T, Okubo Y, Woodbury A, et al. Adherence to technology-based exercise programs in older adults: a systematic review. J Geriatr Phys Ther. 2018;41(1):49-61. [doi: 10.1519/JPT.0000000000000095] [Medline: 27362526]
5. Herold F, Hamacher D, Schega L, et al. Thinking while moving or moving while thinking - concepts of motor-cognitive training for cognitive performance enhancement. Front Aging Neurosci. 2018;10:228. [doi: 10.3389/fnagi.2018.00228] [Medline: 30127732]
6. Fissler P, Küster O, Schlee W, et al. Novelty interventions to enhance broad cognitive abilities and prevent dementia: synergistic approaches for the facilitation of positive plastic change. Prog Brain Res. 2013;207:403-434. [doi: 10.1016/B978-0-444-63327-9.00017-5] [Medline: 24309264]
7. Roure C, Lentillon-Kaestner V, Fargier P. The effects of a play lü inter-team competition exergame on adolescents' moderate-to-vigorous physical activity and situational interest. Presented at: ISBNPA XChange Initiative - "Thinking independently together – Let's dance around the world!"; Vancouver, Canada. URL: http://hdl.handle.net/20.500.12162/4973
8. Röglin L, Martin-Niedecken AL, Ketelhut S. Exercising digitally: a multi-perspective analysis of exergames for physical activity and health promotion. In: Brooks AL, editor. Creating Digitally. Vol 241. Springer International Publishing; 2023:79-116. [doi: 10.1007/978-3-031-31360-8_4]
9. Martin-Niedecken AL, Rogers K, Turmo Vidal L, et al. ExerCube vs. personal trainer: evaluating a holistic, immersive, and adaptive fitness game setup. Presented at: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems; Glasgow Scotland Uk. [doi: 10.1145/3290605.3300318]
10. Martin-Niedecken AL, Mekler ED. The exercube: participatory design of an immersive fitness game environment. In: Göbel S, Garcia-Agundez A, Tregel T, Ma M, Baalsrud Hauge J, Oliveira M, editors. Presented at: International Joint Conference on Serious Games; Darmstadt, Germany. [doi: 10.1007/978-3-030-02762-9_28]
11. Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. The user experience of an immersive and interactive wall exergame in older adults. Games Health J. Jun 2023;12(3):220-227. [doi: 10.1089/g4h.2022.0075] [Medline: 36251866]
12. Béraud-Peigné N, Maillot P, Perrot A. The effects of a new immersive multidomain training on cognitive, dual-task and physical functions in older adults. Geroscience. Apr 2024;46(2):1825-1841. [doi: 10.1007/s11357-023-00952-w] [Medline: 37743415]
13. Anderson-Hanley C, Arciero PJ, Brickman AM, et al. Exergaming and older adult cognition: a cluster randomized clinical trial. Am J Prev Med. Feb 2012;42(2):109-119. [doi: 10.1016/j.amepre.2011.10.016] [Medline: 22261206]
14. Anderson-Hanley C, Barcelos NM, Zimmerman EA, et al. The aerobic and cognitive exercise study (ACES) for community-dwelling older adults with or at-risk for mild cognitive impairment (MCI): neuropsychological, neurobiological and neuroimaging outcomes of a randomized clinical trial. Front Aging Neurosci. 2018;10:76. [doi: 10.3389/fnagi.2018.00076] [Medline: 29780318]

15. Barcelos N, Shah N, Cohen K, et al. Aerobic and cognitive exercise (ACE) pilot study for older adults: executive function improves with cognitive challenge while exergaming. J Int Neuropsychol Soc. Nov 2015;21(10):768-779. [doi: 10.1017/S1355617715001083] [Medline: 26581789]
16. Maillot P, Perrot A, Hartley A. Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. Psychol Aging. Sep 2012;27(3):589-600. [doi: 10.1037/a0026268] [Medline: 22122605]
17. Gallou-Guyot M, Mandigout S, Bherer L, et al. Effects of exergames and cognitive-motor dual-task training on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults: an overview. Ageing Res Rev. Nov 2020;63:101135. [doi: 10.1016/j.arr.2020.101135] [Medline: 32768594]
18. Li J, Erdt M, Chen L, et al. The Social effects of exergames on older adults: systematic review and metric analysis. J Med Internet Res. Jun 28, 2018;20(6):e10486. [doi: 10.2196/10486] [Medline: 29954727]
19. Stojan R, Voelcker-Rehage C. A systematic review on the cognitive benefits and neurophysiological correlates of exergaming in healthy older adults. J Clin Med. May 23, 2019;8(5):734. [doi: 10.3390/jcm8050734] [Medline: 31126052]
20. Torre MM, Temprado JJ. A review of combined training studies in older adults according to A new categorization of conventional interventions. Front Aging Neurosci. 2021;13:808539. [doi: 10.3389/fnagi.2021.808539] [Medline: 35177975]
21. Herold F, Theobald P, Gronwald T, et al. Alexa, let's train now! - a systematic review and classification approach to digital and home-based physical training interventions aiming to support healthy cognitive aging. J Sport Health Sci. Jan 2024;13(1):30-46. [doi: 10.1016/j.jshs.2023.01.004] [Medline: 36736727]
22. Gerling K, Mandryk R. Custom-designed motion-based games for older adults: A review of literature in human-computer interaction. Gerontechnology. 2014;12(2):68-80. [doi: 10.4017/gt.2013.12.2.001.00]
23. Campbell M, Fitzpatrick R, Haines A, et al. Framework for design and evaluation of complex interventions to improve health. BMJ. Sep 16, 2000;321(7262):694-696. [doi: 10.1136/bmj.321.7262.694] [Medline: 10987780]
24. Nawaz A, Skjæret N, Ystmark K, Helbostad JL, Vereijken B, Svanæs D. Assessing seniors' user experience (UX) of exergames for balance training. Presented at: NordiCHI '14: Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational; Oct 26-30, 2014:578-587; Helsinki Finland. Oct 26, 2014.[doi: 10.1145/2639189.2639235]
25. Pyae A, Liukkonen TN, Mika L, et al. Investigating the Finnish elderly people's user experiences in playing digital game-based skiing exercise: a usability study. Gerontechnology. Aug 9, 2017;16(2):65-80. [doi: 10.4017/gt.2017.16.2.002.00]
26. Thin AG, Brown C, Meenan P. User experiences while playing dance-based exergames and the influence of different body motion sensing technologies. International Journal of Computer Games Technology. 2013;2013:1-7. [doi: 10.1155/2013/603604]
27. Vaziri DD, Aal K, Ogonowski C, et al. Exploring user experience and technology acceptance for a fall prevention system: results from a randomized clinical trial and a living lab. Eur Rev Aging Phys Act. 2016;13:6. [doi: 10.1186/s11556-016-0165-z] [Medline: 27293489]
28. Hassenzahl M. The thing and I: understanding the relationship between user and product. In: Blythe MA, Overbeeke K, Monk AF, Wright PC, editors. Funology. Vol 3. Dordrecht: Springer Netherlands; 2003:31-42. [doi: 10.1007/1-4020-2967-5_4]
29. Adcock M, Sonder F, Schättin A, Gennaro F, de Bruin ED. A usability study of a multicomponent video game-based training for older adults. Eur Rev Aging Phys Act. 2020;17:3. [doi: 10.1186/s11556-019-0233-2] [Medline: 31938075]
30. Gerling KM, Schild J, Masuch M. Exergaming for elderly: analyzing player experience and performance. In: Eibl M, editor. Mensch & Computer 2011. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH; 2011:401-411. [doi: 10.1524/9783486712742.401]
31. Adcock M, Thalmann M, Schättin A, et al. A pilot study of an in-home multicomponent exergame training for older adults: feasibility, usability and pre-post evaluation. Front Aging Neurosci. 2019;11:304. [doi: 10.3389/fnagi.2019.00304] [Medline: 31824295]
32. Hoda M, Alattas R, El Saddik A. Evaluating player experience in cycling exergames. Presented at: 2013 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM); Dec 9-11, 2013:415-420; Anaheim, CA, USA. [doi: 10.1109/ISM.2013.81]
33. Soltani P, Figueiredo P, Vilas-Boas JP. Does exergaming drive future physical activity and sport intentions? J Health Psychol. Oct 2021;26(12):2173-2185. [doi: 10.1177/1359105320909866] [Medline: 32114831]
34. Lyons EJ, Tate DF, Ward DS, et al. Engagement, enjoyment, and energy expenditure during active video game play. Health Psychol. Feb 2014;33(2):174-181. [doi: 10.1037/a0031947] [Medline: 23527520]
35. Kim SY (Su), Prestopnik N, Biocca FA. Body in the interactive game: How interface embodiment affects physical activity and health behavior change. Comput Human Behav. Jul 2014;36:376-384. [doi: 10.1016/j.chb.2014.03.067]

36. Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, et al. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. Med Sci Sports Exerc. May 2007;39(5):822-829. [doi: 10.1097/mss.0b013e31803349c6] [Medline: 17468581]
37. de Souto Barreto P, Ferrandez AM, Saliba-Serre. B. Questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées (QAPPA): validation d'un nouvel instrument de mesure en langue française [Article in French]. Sci Sports. Feb 2011;26(1):11-18. [doi: 10.1016/j.scispo.2010.09.006]
38. Hassenzahl M, Burmester M, Koller F. AttrakDiff: ein fragebogen zur messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer qualität [Book in German]. In: Szwillus G, Ziegler J, editors. Mensch &Amp; Computer 2003. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag; 2003:187-196. [doi: 10.1007/978-3-322-80058-9_19]
39. Lallemand C, Koenig V, Gronier G, Martin R. Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs [Article in French]. European Review of Applied Psychology. Sep 2015;65(5):239-252. [doi: 10.1016/j.erap.2015.08.002]
40. Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research. In: Advances in Psychology. Vol 52. Elsevier; 1988:139-183. [doi: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9]
41. Luximon A, Goonetilleke RS. Simplified subjective workload assessment technique. Ergonomics. Feb 20, 2001;44(3):229-243. [doi: 10.1080/00140130010000901] [Medline: 11219757]
42. Bittner AC, Byers JC, Hill SG, et al. Generic workload ratings of a mobile air defense system (LOS-F-H). Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting. Oct 1989;33(20):1476-1480. [doi: 10.1177/154193128903302026]
43. Cegarra J, Morgado N. Actes du 5ème colloque EPIQUE (psychologie ergonomique) [article in french]. Presented at: 5ème Colloque EPIQUE (Ergonomie Psychologique et Ingénierie des Connaissances Utiles en Conception); Nice, France. 2009.URL: https://arpege-recherche.org/user/pages/06.activites/03.colloques-epique/10.5e-colloque-epique/ActesEPIQUE2009.pdf [Accessed 2025-05-22]
44. Kendzierski D, DeCarlo KJ. Physical activity enjoyment scale: two validation studies. J Sport Exerc Psychol. 1991;13(1):50-64. [doi: 10.1123/jsep.13.1.50]
45. Delignières D, Pérez S. Le plaisir perçu dans la pratique des activités physiques et sportives: élaboration d'un outil d'évaluation [Article in French]. STAPS. 1998;19(45):7-18. [doi: 10.3406/staps.1998.1106]
46. Borg GAV. Psychophysical bases of perceived exertion. Medicine & Science in Sports & Exercise. May 1982;14(5):377. [doi: 10.1249/00005768-198205000-00012]
47. Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences. L Erlbaum Associates; 1988:102.
48. Agmon M, Perry CK, Phelan E, et al. A pilot study of Wii Fit exergames to improve balance in older adults. J Geriatr Phys Ther. 2011;34(4):161-167. [doi: 10.1519/JPT.0b013e3182191d98] [Medline: 22124415]
49. Lallemand C, Gronier G. Méthodes de Design UX: 30 Méthodes Fondamentales Pour Concevoir et Évaluer Les Systèmes Interactifs [Book in French]. Paris: Eyrolles; 2015. URL: https://www.utstat.toronto.edu/brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf
50. Pham TP, Theng YL. Game controllers for older adults: experimental study on gameplay experiences and preferences. Presented at: FDG '12: Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games; 284-285; Raleigh North Carolina. [doi: 10.1145/2282338.2282401]
51. Rebsamen S, Knols RH, Pfister PB, et al. Exergame-driven high-intensity interval training in untrained community dwelling older adults: a formative one group quasi- experimental feasibility trial. Front Physiol. 2019;10:1019. [doi: 10.3389/fphys.2019.01019] [Medline: 31440168]
52. Schoene D, Lord SR, Delbaere K, et al. A randomized controlled pilot study of home-based step training in older people using videogame technology. PLoS ONE. 2013;8(3):e57734. [doi: 10.1371/journal.pone.0057734] [Medline: 23472104]
53. Caserman P, Hoffmann K, Müller P, et al. Quality criteria for serious games: serious part, game part, and balance. JMIR Serious Games. Jul 24, 2020;8(3):e19037. [doi: 10.2196/19037] [Medline: 32706669]
54. Li J, Li L, Huo P, et al. Wii or Kinect? A pilot study of the exergame effects on older adults' physical fitness and psychological perception. Int J Environ Res Public Health. Dec 8, 2021;18(24):12939. [doi: 10.3390/ijerph182412939] [Medline: 34948547]

Abbreviations

AVG: active video game
BIKE-VG: bike and video games
I2WE: immersive and interactive wall exergames
IRRID: International Registered Report Identifier
NASA-TLX: NASA-Task Load Index
PACES: Physical Activity Enjoyment Scale
QAPPA: Questionnaire d'Activité Physique pour les Personnes Âgées
RTLX: Raw Task Load Index

TMHR: Theoretical Maximum Heart Rate
UX: User Experience

Edited by Andrew Coristine, Eva Oliveira; peer-reviewed by Kelly M Naugle, Stefan Göbel; submitted 08.10.2024; final revised version received 23.01.2025; accepted 11.02.2025; published 26.05.2025

Please cite as:
Béraud-Peigné N, Perrot A, Maillot P
Active Video Games Training for Older Adults: Comparative Study of User Experience, Workload, Pleasure, and Intensity
JMIR Serious Games 2025;13:e67314
URL: https://games.jmir.org/2025/1/e67314
doi: 10.2196/67314

© Néva Béraud-Peigné, Alexandra Perrot, Pauline Maillot. Originally published in JMIR Serious Games (https://games.jmir.org), 26.05.2025. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work, first published in JMIR Serious Games, is properly cited. The complete bibliographic information, a link to the original publication on https://games.jmir.org, as well as this copyright and license information must be included.

Annexe 11. Exercices des corps de séance d'AM2C (étude 4)

Thème	Titre	Description	Variables facilitantes / complexifiantes
Passes et collaboration	**Passes entre les portes**	Par 2. Une balle par duo. Des portes, matérialisées par des plots, sont disposées dans la salle. Faire un maximum de passes en envoyant la balle à travers les portes matérialisées par des plots. Impossible de faire 2 fois de suite une passe dans la même porte.	Chaque joueur a une balle. Différents types de balles (basket, rugby, mousse, baudruche).
	Passe à 10	Deux équipes. Réaliser 10 passes consécutives au sein d'une équipe. L'équipe en défense doit empêcher l'autre équipe de réaliser cet objectif.	Situation de surnombre. Distance plus ou moins importante à respecter en défense.
	Passes et chasseurs	Deux joueurs sont des chasseurs, les autres joueurs sont des lièvres. Les chasseurs doivent toucher les lièvres avec la balle, sans la lancer. Les deux chasseurs doivent se faire des passes pour pouvoir se déplacer.	Plus ou moins de chasseurs. Porteur de balle peut faire plus ou moins de pas avec le ballon.
	Poser la balle dans camp adverse	Par équipe. Transporter et poser la balle dans le camp adverse uniquement par passes.	Pas le droit de marcher, la balle se déplace uniquement par passes. Différents types de balles (basket, rugby, mousse). Plus ou moins de dribbles autorisés (si balle de basket).
	Rugby avec chasubles	Deux équipes. Marquer en posant le ballon derrière une ligne tout en respectant les passes en arrière. Chaque joueur porte une chasuble à la ceinture. L'équipe en défense doit essayer d'arracher la chasuble du porteur de balle pour récupérer la possession.	Différents types de balles (basket, rugby).
Dribble	**Chasse ballon**	Individuel ou en équipe. Dribbler tout en essayant de faire sortir du terrain le ballon des autres participants.	Différents types de balles (basket, baudruche).
	Slalom relais	Réaliser un slalom en relais, en dribble.	Dribbler main droite, main gauche. Sans dribble mais avec un ballon de baudruche (à faire rebondir sur la main ou sur une raquette de tennis).
	Jeu de l'épervier	Traverser le terrain en dribble, sans se faire attraper par l'épervier.	En dribblant Ballon de football au pied
Jeu d'opposition stratégique	**Les plots renversés**	Deux équipes. 10 plots sont disposés dans la salle (moitié à l'envers, moitié à l'endroit). Une équipe doit retourner le plus de plots possibles à l'endroit, l'autre doit les mettre à l'envers.	Avec ou sans dribble. Marquer un panier pour avoir le droit de retourner un plot. 2 joueurs ensemble pour retourner un plot. Alterner les binômes à chaque déplacement de plot.
	Le déménageur	Transporter un maximum de plots dans le camp adverse.	Obstacles à franchir : échelles de rythme, cerceaux, exercices d'équilibre dynamique. Marquer un panier pour avoir le droit de déménager un plot
	Capture des pinces à linge	1 contre 1. Pinces à linge accrochées sur le tee-shirt au niveau des épaules et du buste. Attraper un maximum de pinces sur l'adversaire tout en conservant les siennes.	Possibilité d'augmenter le nombre de pinces ou de varier les endroits (jambes, dos…).
	Capture du drapeau	Par équipe. Capturer le plot de l'équipe adverse localisé dans la « base » ennemie, et le ramener dans sa base. Chaque participant porte une chasuble au niveau de la ceinture de son pantalon. Si un adversaire vole la chasuble, le joueur doit retourner dans son camp pour pouvoir remettre sa chasuble.	Différentes consignes de déplacement (e.g., montées de genoux, talons-fesses, pas chassés) Ajout de matériel supplémentaire : ballon de baudruche, ballon de basket
	Évasion contre le mur	1 contre 1. Une personne est dos au mur dans un carré de 2 m et essaie d'esquiver la balle. L'autre joueur essaie de le toucher avec un ballon en mousse.	Varier les trajectoires
	Morpion dynamique	Par équipe. Aligner 3 plots sur une grille 3 x 3 au sol. Une équipe possède trois plots d'une couleur, l'autre équipe trois plots d'une autre couleur.	Avec parcours (échelle, plots, cerceaux)

Annexe 12. Exercices de renforcement musculaire d'AM2C (étude 4)

Partie du corps	Exercice	Variables facilitantes / complexifiantes
Haut du corps	Tirages (horizontaux, verticaux) avec des élastiques	
	Passes	Différents types de balles : balle légère, ballon lesté, balle de tennis Différents types de passes (directe, avec un rebond au sol, au-dessus de la tête) 2 balles Ajout objet : raquette de tennis
	Soulever, bras tendus, un ballon lesté à hauteur d'épaule	
Bas du corps	Assis-debout (s'asseoir/se lever d'une chaise)	
	Mouvements de boxe (direct, crochet, uppercut)	
	Monter et descendre sur une plateforme de Step	
	Différents déplacements dans une échelle de rythme	Varier la vitesse / séquence des appuis
Tout le corps	Assis-debout avec une balle au-dessus de la tête	Différents types de balles : balle légère, ballon lesté, balle de tennis Différents types de passes (directe, avec un rebond au sol, au-dessus de la tête) 2 balles Ajout objet : raquette de tennis
	Assis-debout + passe	
	Monter et descendre sur une plateforme de Step + passes	
	Déplacements en pas chassé entre deux plots. Faire la passe au niveau de chaque plot.	
	Haies à franchir de côté + passe	
	Face à face, une haie devant chaque participant. Les deux posent 2 appuis devant leur haie, font une passe, puis posent 2 appuis derrière. Ainsi de suite	
Équilibre	Tenir en appui unipodal + passe	Ajout d'une tâche haut du corps (faire tourner une balle autour de la taille, de la tête)
	Marche en tandem	
	Poser le pied en fonction d'un plot de couleur (rouge : pied droit, bleu : pied gauche, blanc : deux pieds)	

Annexe 13. Échauffements du programme EM2I (étude 4)

Thème	Consignes	Variables facilitantes / complexifiantes
Lancer et rattraper une balle	Par 2, face à face, se faire des passes avec une balle.	Main droite Main gauche Augmenter/réduire la distance Avec ou sans rebond au sol. Avec 1 ou 2 ballons. Effectuer un concours (e.g., faire le plus de passes possibles en 30 secondes) Ajouter une raquette de tennis. Balle de rugby Balle de foot et donc balle au pied
	Par 2, face à face, se faire des passes avec un ballon de baudruche en le faisant rebondir sur sa main	
	Par 2, face à face, se déplacer de manière coordonnée en pas chassé vers un plot sur le côté et faire une passe une fois le plot atteint par les deux participants. Répéter plusieurs fois.	
	Seul, face au mur, se faire des passes.	
	Par 2, face au mur, se faire des passes.	
	Par 4, avec 1 balle, deux colonnes de 2 participants sont constituées face à face à environ 3 mètres l'une de l'autre. Le premier participant de la colonne doit faire une passe au 1er participant de la colonne d'en face, puis aller se positionner derrière cette même colonne. Ainsi de suite.	
Se baisser pour récupérer une balle	Par 4, 10 plots sont répartis dans la salle, la moitié des plots est placée à l'envers, l'autre moitié à l'endroit. Une équipe doit mettre les plots à l'endroit, pendant que l'autre doit les retourner à l'envers. Pour cela, les participants sont invités à se concentrer sur une flexion des jambes, sans bouger le dos. À la fin du temps imparti, l'équipe qui a le plus de plots de son côté remporte la partie.	Avec ou sans dribble.
	Par 4, jeu du déménageur : deux camps avec des plots au sol sont disposés aux extrémités de la salle. Les participants doivent déplacer les plots de leur camp vers le camp adverse. Pour récupérer et déposer les plots, les participants sont invités à se concentrer sur une flexion des jambes, sans bouger le dos. À la fin du temps imparti, l'équipe qui a le moins de plots de son côté remporte la partie.	Obstacles à franchir : échelles de rythme, cerceaux, exercices d'équilibre dynamique.
Situation de double-tâche avec une balle	Seul, dribbler tout en réalisant différents déplacements (e.g., montées de genoux, talons-fesses, marcher sur la pointe des pieds).	Main droite, main gauche. Idem sans dribble mais avec un ballon de baudruche. Idem avec une raquette de tennis
	Seul, dribbler avec une main, tout en ayant un ballon à tenir en équilibre bras tendu avec l'autre main.	Main droite, main gauche. Se lancer la balle, tout en conservant le dribble avec l'autre main. Ajouter différents types de déplacements (e.g., montées de genoux, talons-fesses)
	Par 2, face à face, dribbler d'une main, tout en se passant une balle avec l'autre main.	Passer la balle de main en main, en faisant une passe avec un rebond au sol ou sans rebond. Sans déplacement ou en marchant.
	Seul, se déplacer dans tout l'espace en tenant un ballon de baudruche posé sur la main tout en réalisant différents déplacements (e.g., montées de genoux, talons-fesses, marcher sur la pointe des pieds).	Main droite Main gauche Idem avec une raquette de tennis
	Seul, se déplacer dans tout l'espace en tenant un ballon de baudruche posé sur la main et échanger le ballon lors d'un croisement avec un autre participant.	
	Par 4. Chaque participant doit faire rebondir sur sa main un ballon de baudruche. L'objectif est de conserver son ballon et de réussir à chasser le ballon des autres participants. Individuel ou par équipe.	
	Jeu de l'épervier. Un joueur est désigné comme l'Épervier et se place au centre du terrain. Tous les autres joueurs se tiennent derrière une des lignes de départ. Au signal, les joueurs doivent traverser le terrain, avec une contrainte de déplacement, pour rejoindre l'autre côté sans se faire attraper par l'épervier.	En dribblant. Ballon de football au pied. Idem sans dribble mais avec un ballon de baudruche. Idem avec une raquette de tennis.
	Slalom sous forme de relais.	

Annexe 14. Description des jeux EM2I (étude 4)

Jeux et descriptions	Stimulations physiques et motrices		Joueurs
	Spécifiques	Générales	
Oni Gokko. Les participants doivent effectuer plusieurs mini-jeux : *Pendu, Cherche et trouve, Memory* et *Lettres Mêlées*. L'objectif est de remporter le plus de points possibles.	Haut du corps (lancer balle) + bas du corps (se baisser pour récupérer la balle)	Endurance Résistance musculaire Coordination Souplesse Équilibre Habiletés motrices complexes : attraper/lancer un ballon à la main/au pied, jauger la hauteur/force, marcher/ trottiner/courir/pas chassés	4 vs 0
Break It Handball. Ce jeu consiste à viser les diverses briques qui s'affichent à l'écran pour passer les niveaux. L'objectif du jeu est de passer les différents niveaux et d'atteindre le plus haut score dans le temps imparti.			
Treasure Island. Ce jeu consiste à récolter le plus de points, en quatre parties pour trouver le trésor final : a) empêcher le bateau de se faire envahir en touchant les animaux pour les éliminer, b) retrouver le maximum d'indices sur la carte, c) trouver le trésor enfoui sous le sable, d) toucher les tentacules pour éviter qu'elles n'attaquent le bateau.			
Robotarium. Les participants doivent reformer le maximum de robots. Pour cela, ils doivent se référer à un modèle et retrouver les pièces correspondantes dans l'espace.			
Zombies vs Brains. Les participants doivent se défendre de l'attaque des zombies à travers un jeu en quatre étapes : a) protéger sa base, b) sauver les survivants, c) détruire les cerveaux défectueux, d) protéger à nouveau la base.			
Angry Birds Smash. Ce jeu consiste à détruire le plus de forteresses et de cochons possible à l'écran pour passer les niveaux. L'objectif est de passer les différents niveaux et d'atteindre le plus haut score dans le temps imparti**.**			
Clash Of Seasons. Toucher les enfants quand ils sortent de leur cachette afin de les empêcher de lancer des boules de neige.			
Arena Masters. Les participants doivent détruire des drones avant qu'ils ne leur tirent dessus.			
Meteor of Color. Les participants doivent détruire les astéroïdes de la couleur indiquée par l'environnement pour atteindre le maximum de points possible.			
Heroes vs Invaders. Les participants doivent marquer des points en envoyant la balle dans une cage de football, protégée par un gardien qui possède des forces et faiblesses différentes en fonction des niveaux (e.g., taille, déplacements, rapidité).	Bas du corps : tirer au pied dans la balle		2 vs 2
OXO. Ce jeu de réflexion reprend les mécanismes du jeu *morpion*. L'objectif est d'aligner 3 symboles sur la grille pour remporter la victoire.	Haut (lancer balle) + bas du corps (se baisser pour récupérer la balle)		
Ice Cream Factory. Deux équipes s'affrontent afin d'exécuter le plus rapidement possible des commandes de glaces et remporter des pièces. L'équipe qui remporte le plus de pièces à la fin du temps gagne.			
Totem Craft. Par équipe, les participants doivent construire le plus haut totem possible, à travers un jeu en 3 étapes : a) récupérer le plus d'objets possibles, b) mettre les objets à l'endroit, c) détruire le plus d'objets possibles du totem adverse.			
Abakus. Les participants doivent résoudre des opérations mathématiques afin de remporter le maximum de points.			
Spread Out. Deux équipes s'affrontent pour essayer de conquérir le plus de territoire possible. Pour cela, il faut viser les tuiles de leur couleur pour les répandre le plus possible, avant l'adversaire.			
Hit the Beat. Lors de ce jeu, les participants doivent toucher au bon moment des cibles qui apparaissent au rythme de la musique.	Haut (toucher mur) + Bas du corps (fléchis statique)		1 vs 1 vs 1

Annexe 15. Complexifications des jeux EM2I (étude 4)

Thème	Jeux	Consignes	Variables
Créer de l'opposition et de la coopération	*Clash of seasons* *Robotarium* *Angry Birds Smash* *Break It Handball* *Arena Masters* *Meteor of Color*	2 contre 2. Jeu du déménageur (décrit dans l'**Error! Not a valid result for table.**).	
		2 contre 2. 1 équipe doit retourner le plus de plots possible à l'endroit, l'autre à l'envers (décrit dans l'**Error! Not a valid result for table.**).	
		Individuel, récupérer un plot et le placer dans son camp à chaque fois qu'une cible est touchée	Varier le nombre de cibles à toucher
		2 contre 2. Jeu du morpion. Une grille de 3 x 3 sur le sol. Une équipe possède trois plots d'une couleur, l'autre équipe trois plots d'une autre couleur. Dès qu'un joueur réussit à toucher une cible sur le mur, il peut placer son plot dans une case de la grille. L'objectif est d'aligner trois plots horizontalement, verticalement ou bien en diagonale avant l'adversaire.	
Intensifier la difficulté physique et/ou motrice	*Clash of seasons* *Robotarium* *Angry Bird Smash* *Break It Handball* *Arena Masters* *Meteor of Color* *Heroes vs Invaders*	Individuel, tous les 3 tirs, faire le tour d'un plot en dribblant.	Varier le nombre de tir nécessaires pour aller faire le tour du plot Augmenter / réduire la distance du plot
		Individuel, tous les 3 tirs, franchir un parcours avant de pouvoir retourner tirer.	Réaliser 3 répétitions du mouvement assis-debout sur une chaise avant de tirer Franchir une échelle de rythme Franchir un slalom en dribblant Réaliser un exercice d'équilibre dynamique ou statique Faire une tâche de STEP Franchir des haies
	OXO *Abakus*	Par équipe de 2, chaque équipe tire à son tour. Chaque participant doit faire le tour d'un plot avant de pouvoir aller tirer de nouveau sur le mur.	Réaliser 3 répétitions du mouvement assis-debout sur une chaise avant de tirer Franchir une échelle de rythme Franchir un slalom en dribblant
	OXO	Individuel, le participant doit faire rebondir un ballon de baudruche sur sa main non-dominante, pendant qu'il pourra tirer avec sa main forte.	
	Tous les jeux	Individuel, tirer de la main gauche	
		Individuel, tirer avec une raquette et une balle de tennis	
		Individuel, tirer avec une balle de rugby	
		Individuel, des plots de différentes couleurs sont répartis dans la salle. L'EAPA annonce une suite de couleurs. Au bout de X tirs (nombre défini par l'enseignant), le participant doit aller toucher la suite de couleurs.	

Annexe 16. Description des jeux SWITCH (étude 4)

Jeux et descriptions	Stimulations physiques et motrices		Joueurs
	Spécifiques	Générales	
Let's Get Fit. Ce jeu consiste à suivre un avatar qui effectue des mouvements sportifs (e.g., lever les genoux, talons-fesses, squats).	Haut + bas du corps (divers mouvements corporels)	Résistance musculaire Motricité Coordination	1 vs 1 vs 1 vs 1
Just Dance. Les joueurs suivent des chorégraphies de danse à l'écran en imitant les mouvements des danseurs virtuels du mieux qu'ils peuvent. Une centaine de chorégraphies sont disponibles.	Haut + bas du corps (divers mouvements de danse)		
Bowling sur Nintendo Switch Sports. Quatre joueurs s'affrontent. Pour lancer, il faut effectuer un mouvement de balancier pour ajuster la puissance, la direction et l'effet de la boule. L'objectif, comme au bowling, est de marquer le plus de points possible.	Haut du corps (balancement du bras)		
Équitation sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques. Épreuve où le joueur doit contrôler son cheval pour parcourir un circuit semé d'obstacles et franchir la ligne d'arrivée le plus rapidement possible. En utilisant les Joy-Con, il doit gérer la vitesse, diriger son cheval et synchroniser ses sauts pour éviter les pénalités. Le jeu repose sur la précision et le timing, car un bon rythme de course et des sauts bien placés permettent d'optimiser la performance. En mode multijoueur, les joueurs s'affrontent pour réaliser le meilleur temps et éviter les fautes.	Haut du corps (petits mouvements des bras)		
Natation sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques. Épreuve où le joueur doit reproduire les mouvements de nage à l'aide des Joy-Con pour avancer le plus rapidement possible dans la piscine olympique. Le type de nage (crawl, brasse, dos crawlé, papillon) influence le rythme et le style des mouvements à effectuer. La gestion de l'endurance et du timing est essentielle pour optimiser la vitesse sans s'épuiser trop vite. En mode multijoueur, les joueurs s'affrontent pour toucher le mur d'arrivée en premier, ajoutant un aspect compétitif.	Haut du corps (mouvements de différentes nages)		
Run'n Jump sur Instant Sports. Épreuve où le joueur doit courir et sauter pour franchir différents obstacles sur un parcours dynamique. En utilisant les Joy-Con, il doit réaliser des mouvements précis pour accélérer, sauter ou éviter les obstacles qui se dressent sur son chemin. Le jeu repose sur la réactivité et la coordination, avec des niveaux de difficulté progressifs où les obstacles deviennent plus nombreux et plus rapides. En mode multijoueur, les participants s'affrontent pour parcourir la distance la plus longue ou terminer le parcours en premier.	Haut du corps (balancement des bras)		
Canoë sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques. Épreuve où le joueur doit pagayer en rythme pour faire avancer son embarcation le plus rapidement possible jusqu'à la ligne d'arrivée. En utilisant les Joy-Con, il doit effectuer des mouvements de pagaie précis pour maintenir la vitesse et la direction du canoë. Le défi repose sur la synchronisation et la gestion du rythme, notamment en mode multijoueur, où une bonne coordination entre les équipiers est essentielle pour optimiser la vitesse.	Haut du corps (balancement des bras)		2 vs 2
Rafting sur Instant Sports. Épreuve où le joueur doit pagayer en rythme, en utilisant les Joy-Con comme des rames. La coordination des mouvements influence la vitesse et la direction du radeau, demandant une bonne gestion du timing pour éviter les obstacles et atteindre l'arrivée le plus rapidement possible. Le parcours est semé de défis, comme des courants forts, des rochers et des virages serrés, rendant la navigation plus complexe à mesure que la difficulté augmente. En mode multijoueur, les participants doivent synchroniser leurs gestes pour avancer efficacement au sein d'une même embarcation.	Haut du corps (rotation des épaules)		
Goalkeeper sur Instant Sports. Mini-jeu où le joueur incarne un gardien de but, chargé d'arrêter les tirs adverses. Il doit réagir rapidement pour plonger, bloquer et détourner les ballons venant de différentes directions et avec des vitesses variables.	Haut du corps (petits mouvements des bras)		
Fitness Boxing 2. Ce jeu combine des mouvements inspirés de la boxe (e.g., uppercut, crochet, coup droit) avec des éléments de jeu basés sur la musique et le rythme. Les joueurs utilisent les contrôleurs Joy-Con pour simuler une série de mouvements de boxe en synchronisation avec la musique et les indications à l'écran.	Haut du corps (différents coups de poing)		1 vs 1
Football sur Nintendo Switch Sports. Deux participants s'affrontent. L'objectif est de marquer plus de buts que leur adversaire. Chaque participant déplace son avatar avec le Joystick du Joy-Con tenu dans sa main dominante et frappe le ballon avec un Joy-Con placé sur sa jambe préférée.	Haut du corps (balancement des bras) + bas du corps (tirer au pied)		

Annexe 16. Suite

Badminton sur Nintendo Switch Sports. Deux joueurs s'affrontent avec pour objectif de faire tomber le volant dans le camp adverse, sans que ce dernier n'arrive à le rattraper. L'objectif est de marquer plus de points que l'adversaire. Ce jeu combine des commandes de mouvement (i.e., direction de frappe, timing de frappe, smash) et l'utilisation de boutons (i.e., amorti).	Haut du corps (coup droit, revers, smash)		
Boxe sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques. Jeu de combat dynamique où les joueurs s'affrontent en utilisant des coups de poing et des esquives.	Haut du corps (différents coups de poing)		
Knockout Home Fitness. Jeu inspiré de la boxe et des arts martiaux. Le jeu détecte les mouvements grâce aux Joy-Con qui permettent d'exécuter des enchaînements de boxe, kick-boxing, muay thaï et karaté.	Haut du corps (différents coups de poing) + bas du corps (différents coups de pied)		
Chambara sur Nintendo Switch Sports. *Chambara* est un jeu de combat à l'épée dans lequel les joueurs utilisent les Joy-Con pour simuler des attaques et des parades en temps réel. L'objectif est de faire tomber l'adversaire hors de la plateforme, en l'attaquant de manière stratégique tout en se défendant.	Haut du corps (mouvements verticaux, horizontaux et diagonaux des bras)		

Annexe 17. Complexifications des jeux SWITCH (étude 4)

Thème	Jeux	Variables
Intensifier la difficulté physique et/ou motrice	*Let's Get Fit* *Just Dance* *Équitation sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques* *Fitness Boxing 2* *Knockout Home Fitness* *Run'n Jump sur Instant Sports* *Rafting sur Instant Sports* *Boxe sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques*	Poids aux chevilles et/ou aux bras
	Run'n Jump sur Instant Sports *Knockout Home Fitness* *Rafting sur Instant Sports* *Équitation sur Mario & Sonic aux Jeux Olympiques* *Bowling sur Nintendo Switch Sports*	Tenir en équilibre sur une mousse instable
	Fitness Boxing 2 *Knockout Home Fitness*	Monter et descendre d'une plateforme de Step Passer devant / derrière une haie

Annexe 18. Codage des contrastes (étude 4)

Le codage des contrastes a suivi les principes méthodologiques suivants : i) la somme des coefficients pour chaque contraste est égale à zéro, ii) les coefficients ont été attribués de manière équilibrée entre les groupes comparés, iii) les groupes non concernés par le contraste ont reçu un poids nul, iv) les coefficients ont été normalisés afin de permettre une interprétation correcte et d'éviter de biaiser la comparaison.

1. Codage des contrastes planifiés dans les ANOVA simples – étape 3.3

Des contrastes planifiés ont été réalisés sur le facteur *groupe*. Quatre contrastes ont été testés :

1. Entraînement simultané (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) vs entraînement physique (i.e., VÉLO) ;
2. Entraînement simultané vs entraînement cognitif (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH, JV) ;
3. Entraînement incorporé (i.e., AM2C, EM2I, SWITCH) vs additionnel (i.e., VÉLO-JV) ;
4. Entraînement simultané virtuel (i.e., EM2I, SWITCH, VÉLO-JV) vs entraînement simultané naturel (i.e., AM2C).

Codage des contrastes :

Lorsque 4 groupes sont impliqués dans la comparaison (e.g., entraînement simultané), chaque groupe reçoit un poids de +0,25 ; lorsque 3 groupes sont impliqués (e.g., entraînement incorporé), chaque groupe reçoit un poids de +0,333. Le groupe contrôle comparatif reçoit un poids de -1. Les groupes non inclus dans le contraste reçoivent un poids nul.

2. Codage des contrastes planifiés dans l'ANOVA à mesures répétées (pré-tests vs post-tests) – étape 3.4

Ce codage vise à capter spécifiquement l'interaction *temps* × *groupe*, en isolant l'effet différentiel de progression entre les stimulations expérimentales et les stimulations comparatives, entre les pré-tests et les post-tests.

Des contrastes planifiés ont été conduits pour tester six hypothèses spécifiques :

1. Entraînement simultané vs contrôle ;
2. Entraînement incorporé vs contrôle ;
3. Entraînement simultané vs entraînement physique seul ;
4. Entraînement simultané vs entraînement cognitif seul ;
5. Entraînement incorporé vs entraînement additionnel ;
6. Entraînement simultané virtuel vs entraînement simultané naturel.

Codage des contrastes :

Les groupes expérimentaux sont pondérés de manière égale. Le poids attribué à chaque groupe dépend du nombre total de groupes expérimentaux inclus dans la comparaison :

- Si la comparaison comprend 4 groupes (e.g., entraînement simultané), chaque groupe reçoit un poids de +0,25 aux pré-tests et -0,25 au post-tests ;
- Si elle comprend 3 groupes (e.g., entraînement incorporé), chaque groupe reçoit un poids de +0,333 aux pré-tests et -0,333 aux post-tests.

Le groupe comparatif est codé à -1 aux pré-tests et à +1 aux post-tests. Les groupes non inclus dans le contraste reçoivent un poids nul aux deux temps de mesure.

3. Codage des contrastes planifiés dans l'ANOVA à mesures répétées (pré-tests vs post-tests vs tests de rétention)

Ce codage vise à capter spécifiquement l'interaction *temps* × *groupe*, en isolant les effets différentiels d'évolution entre les stimulations expérimentales et les stimulations comparatives à travers les différentes phases de mesure : 1) entre les pré-tests et les post-tests, 2) entre les pré-tests et les tests de rétention, et 3) entre les post-tests et les tests de rétention.

Codage des contrastes :

Le même principe de codage que celui utilisé pour les comparaisons *pré-tests vs post-tests* a été appliqué. Les six hypothèses initiales ont été conservées pour ces comparaisons complémentaires. Trois types de comparaisons temporelles ont été réalisées : pré-tests vs post-tests, *pré-tests vs tests de rétention* et *post-tests vs tests de rétention.*

Annexe 19. Traitements statistiques complémentaires pour les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests (étude 4)

Afin de répondre aux hypothèses d'homogénéité des variances et de sphéricité exigées par les ANOVA, plusieurs traitements statistiques ont été appliqués.

1. Transformation des données

Pour corriger les violations de l'hypothèse d'égalité des variances, une transformation logarithmique a été appliquée aux variables suivantes :

- Assis debout
- Coordination
- Gratte-dos
- Temps de réaction à 2 choix
- Temps de réaction à 8 choix inhibition
- Score d'inhibition
- Empan inverse
- TMT B
- TMT B-A
- STEP (ST)
- Comptage sonore (ST, DT, DTE)
- Tâche de décompte (ST)
- Go/No-Go (erreurs) (DT)

2. Violation persistante de l'homogénéité des variances malgré transformation

Malgré la transformation des données, l'hypothèse d'égalité des variances n'a pu être respectée pour :

- Coordination
- Temps de réaction à 2 choix
- Empan inverse
- Tâche motrice (ST)
- DTE (tâche cognitive 2)

3. Utilisation de covariables (pré-tests)

En cas de différence significative entre les groupes aux pré-tests, la mesure initiale a été intégrée en tant que covariable dans l'analyse pour contrôler cette variabilité. C'est le cas pour les variables suivantes :

- 30 secondes assis-debout (logarithme népérien)
- DTE (tâche cognitive 2) (logarithme népérien)

Annexe 20. Différences en pré-tests entre les groupes (étude 4)

	F	*p*
Capacités cognitives		
Temps de réaction		
2 choix[a,b] *(s)*	0,46	0,839
8 choix (s)	0,32	0,928
8 choix inhibition[a] *(s)*	0,86	0,527
Inhibition		
Score inhibition[a] *(s)*	1,00	0,426
Go/No-Go		
Temps - moyenne (ms)	0,42	0,868
Temps - écart-type (ms)	0,79	0,580
Erreurs (n)	0,19	0,980
MVCT et MVDT		
Empan simple (n)	0,98	0,439
Empan inverse[a] *(n)*	1,50	0,182
Flexibilité mentale		
TMT B[a] *(s)*	1,41	0,217
TMT B-A[a] *(s)*	0,88	0,514
Double-tâche		
ST		
Comptage sonore[a] *(n)*	0,28	0,945
Décompte[a] *(n)*	1,67	0,132
STEP[a] *(n)*	1,05	0,397
DT cognitivo-cognitive		
Tâche cognitive 1 (moyenne TR)	0,21	0,975
Tâche cognitive 1 (écart-type TR)	0,64	0,694
Tâche cognitive 1 (erreurs)	0,36	0,903
Tâche cognitive 2	0,64	0,696
DT cognitivo-motrice		
Tâche cognitive	1,22	0,299
Tâche motrice	0,37	0,898
DTE cognitivo-cognitive		
Tâche cognitive 1 (moyenne TR)	0,83	0,548
Tâche cognitive 1 (écart-type TR)	1,32	0,250
Tâche cognitive 1 (erreurs)	0,68	0,669
Tâche cognitive 2[a,b]	3,99	**0,001**
DTE cognitivo-motrice		
Tâche cognitive	0,60	0,729
Tâche motrice	0,77	0,593
Capacités physiques et motrices		
Capacités musculaires		
30 s assis-debout[a] *(n)*	2,88	**0,011**
Handgrip (kg)	0,69	0,656
Lancer de medicine ball (cm)	0,40	0,875
Souplesse		
Sit-and-reach (cm)	1,21	0,306
Gratte-dos[a,b] *(cm)*	2,17	0,059
Équilibre		
TUG (s)	1,62	0,147
Coordination		
Test de coordination[a] *(s)*	0,90	0,496
Capacités aérobies		
TM6 (m)	1,48	0,190

Note. *MVCT : Mémoire Visuospatiale à Court Terme : MVDT : Mémoire Visuospatiale De Travail ; TMT : Trail Making Test ; TM6 : Test de Marche de 6 minutes ; TR : Temps de Réaction ; TUG : Timed Up and Go ; n : nombre ; s : seconde ; kg : kilogramme ; cm : centimètre ; m : mètre ; ms : milliseconde.* [a] *: les calculs ont été réalisés sur les données transformées logarithmiquement ;* [b] *: la correction de Brown-Forsythe est appliquée pour corriger l'inégalité des variances.*

Annexe 21. Détails résultats post hoc pour l'effet de groupe au test 30 secondes assis-debout (étude 4)

		p	*d*
AM2C	*GC*	0,745	0,49
	JV	0,836	0,47
	EM2I	1,000	0,14
	SWITCH	0,925	0,36
	VÉLO-JV	**0,035**	1,01
	VÉLO	0,073	0,95
GC	*JV*	1,000	0,17
	EM2I	0,904	0,35
	SWITCH	1,000	0,13
	VÉLO-JV	0,614	0,52
	VÉLO	0,768	0,46
JV	*EM2I*	0,950	0,34
	SWITCH	1,000	0,11
	VÉLO-JV	0,679	0,54
	VÉLO	0,807	0,48
EM2I	*SWITCH*	0,989	0,22
	VÉLO-JV	0,060	0,87
	VÉLO	0,125	0,82
SWITCH	*VÉLO-JV*	0,344	0,65
	VÉLO	0,507	0,59
VÉLO-JV	*VÉLO*	1,00	0,05

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo*

Annexe 22. Détails résultats post hoc pour l'effet de groupe au DTE (tâche cognitive 2) (étude 4)

		p	*d*
AM2C	*GC*	0,177	-1,05
	JV	0,362	-0,97
	EM2I	0,496	-0,77
	SWITCH	0,998	-0,23
	VÉLO-JV	0,131	-1,10
	VÉLO	0,081	-1,22
GC	*JV*	1,000	0,08
	EM2I	0,913	0,29
	SWITCH	0,110	0,82
	VÉLO-JV	1,000	-0,05
	VÉLO	0,995	-0,17
JV	*EM2I*	0,995	0,21
	SWITCH	0,401	0,74
	VÉLO-JV	1,000	-0,13
	VÉLO	0,988	-0,25
EM2I	*SWITCH*	0,520	0,54
	VÉLO-JV	0,802	-0,34
	VÉLO	0,568	-0,46
SWITCH	*VÉLO-JV*	0,063	-0,88
	VÉLO	**0,032**	-0,99
VÉLO-JV	*VÉLO*	0,999	-0,12

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo*

Annexe 23. Modèles de régression (capacités physiques) pour prédire les évolutions cognitives (étude 4)

	Modèle		β standardisé	t	p
TR 2	R^2 = 0,05,	*Force bas du corps*	–0,04	–0,46	0,647
	p = 0,247	*Coordination*	0,16	1,76	0,080
		Capacités aérobies	0,022	0,25	0,804
		Souplesse bas du corps	0,16	1,28	0,070
		Équilibre	–0,03	–0,37	0,715
TR 8	R^2 = 0,03,	*Force bas du corps*	-0,08	-0,90	0,371
	p = 0,646	*Coordination*	-0,02	-0,20	0,843
		Capacités aérobies	-0,12	-1,30	0,196
		Souplesse bas du corps	-0,01	-0,11	0,915
		Équilibre	0,04	0,41	0,684
TR 8 inhibition	R^2 = 0,03,	*Force bas du corps*	-0,09	-0,99	0,324
	p = 0,557	*Coordination*	0,02	0,26	0,798
		Capacités aérobies	0,00	0,00	1,000
		Souplesse bas du corps	-0,01	-0,10	0,921
		Équilibre	0,11	1,22	0,224
Score inhibition	R^2 = 0,04,	*Force bas du corps*	0,04	0,44	0,660
	p = 0,218	*Coordination*	0,10	1,06	0,291
		Capacités aérobies	-0,01	-0,07	0,941
		Souplesse bas du corps	0,01	0,07	0,947
		Équilibre	0,02	0,26	0,792
Go/No-Go (ET)	R^2 = 0,03,	*Force bas du corps*	0,10	1,10	0,273
	p = 0,627	*Coordination*	-0,01	-0,13	0,898
		Capacités aérobies	-0,09	-0,96	0,337
		Souplesse bas du corps	0,07	0,76	0,447
		Équilibre	0,11	1,13	0,263
Empan simple	R^2 = 0,02,	*Force bas du corps*	0,06	0,60	0,547
	p = 0,675	*Coordination*	-0,12	-1,30	0,196
		Capacités aérobies	-0,03	-0,32	0,747
		Souplesse bas du corps	-0,08	-0,87	0,385
		Équilibre	0,01	0,16	0,876
TMT B-A	**R^2 = 0,12,**	*Force bas du corps*	-0,10	-1,11	0,269
	***p* = 0,007**	*Coordination*	0,21	2,22	**0,028**
		Capacités aérobies	-0,17	-2,01	**0,047**
		Souplesse bas du corps	0,04	0,43	0,671
		Équilibre	0,06	0,71	0,478

Note. *ET : Écart-Type ; TMT : Trail Making Test ; TR : temps de réaction.*

Annexe 24. Modèles de régression (indicateurs programmes) pour prédire les évolutions cognitives (étude 4)

	Modèle		β standardisé	t	p
TR 2	R^2 = 0,02,	*Intensité physique*	0,09	0,92	0,360
	p = 0,548	*Intensité cognitive*	0,01	0,07	0,945
		Plaisir	-0,14	-1,39	0,168
TR 8	R^2 = 0,02,	*Intensité physique*	-0,18	-1,69	0,095
	p = 0,414	*Intensité cognitive*	-0,03	-0,28	0,782
		Plaisir	0,04	0,44	0,659
TR 8 inhibition	R^2 = 0,00,	*Intensité physique*	-0,05	-0,45	0,654
	p = 0,911	*Intensité cognitive*	-0,06	-0,65	0,517
		Plaisir	-0,00	-0,01	0,990
Score inhibition	R^2 = 0,04,	*Intensité physique*	0,02	0,24	0,809
	p = 0,218	*Intensité cognitive*	-0,07	0,71	0,477
		Plaisir	0,09	0,89	0,377
Go/No-Go (ET)	R^2 = 0,04,	*Intensité physique*	0,12	1,28	0,204
	p = 0,155	*Intensité cognitive*	-0,03	-0,29	0,770
		Plaisir	0,21	2,11	0,037
Empan simple	**R^2 = 0,09,**	*Intensité physique*	0,11	1,06	0,289
	***p* = 0,009**	*Intensité cognitive*	0,28	3,09	**0,003**
		Plaisir	0,14	1,46	0,146
TMT B-A	**R^2 = 0,08,**	*Intensité physique*	-0,13	-1,33	0,186
	***p* = 0,026**	*Intensité cognitive*	-0,20	-2,14	**0,034**
		Plaisir	-0,17	-1,69	0,094

Note. *ET : écart-type ; TMT : Trail Making Test ; TR : Temps de Réaction.*

Annexe 25. Traitements statistiques complémentaires pour les comparaisons entre les pré-tests, les post-tests et les tests de rétention (étude 5)

Afin de répondre aux hypothèses d'homogénéité des variances et de sphéricité exigées par les ANOVA, plusieurs traitements statistiques ont été appliqués.

1. Transformation des données

Pour corriger les violations de l'hypothèse d'égalité des variances, une transformation logarithmique a été appliquée aux variables suivantes :

- Coordination
- Score d'inhibition
- TMT B
- ST et DT comptage sonore

2. Correction de la sphéricité

Lorsque l'hypothèse de sphéricité a été violée (test de Mauchly), la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée aux variables suivantes

- Temps de réaction à 8 choix inhibition
- *Sit-and-reach test*
- Go/No-Go (temps – moyenne) en DT

3. Violation persistante de l'homogénéité des variances malgré transformation

Malgré la transformation des données, l'hypothèse d'égalité des variances n'a pu être respectée pour :

- Coordination
- Score d'inhibition
- ST comptage sonore

4. Utilisation de covariables (pré-tests)

En cas de différence significative entre les groupes en pré-tests, la mesure initiale a été intégrée en tant que covariable dans l'analyse pour contrôler cette variabilité. C'est le cas pour les variables suivantes :

- TMT B

Annexe 26. Différences en pré-tests entre les groupes pour les tests cognitifs, physiques et de DT (étude 5)

	F	*p*
Capacités cognitives		
Temps de réaction		
2 choix	0,96	0,454
Inhibition		
Score inhibition[a]	0,90	0,495
Go/No-Go		
Temps - Moyenne	0,99	0,437
Temps - écart-type	1,05	0,397
Erreurs	0,27	0,950
Flexibilité mentale		
TMT B[a]	2,73	**0,017**
Double-tâche		
Tâche cognitive 1		
DT - Go/No-Go		
Temps - Moyenne	0,40	0,879
Temps - écart-type	0,59	0,741
Erreurs	0,54	0,777
Tâche cognitive 2		
ST[a,b]	0,63	0,708
DT[a,b]	1,54	0,177
Capacités physiques		
Capacités musculaires		
30 s assis-debout	1,60	0,154
Lancer de medicine ball	1,15	0,339
Souplesse		
Gratte-dos	1,29	0,270
Sit-and-reach test	0,70	0,652
Coordination		
Test de coordination	1,46	0,201

Note. *DT : Double-Tâche ; TMT : Trail Making Test ; ST : Simple-Tâche.* [a] *: les calculs ont été réalisés sur les données transformées logarithmiquement,* [b] *: la correction de Brown-Forsythe est appliquée pour corriger l'inégalité des variances.*

Annexe 27. Différences en pré-tests entre les groupes pour le questionnaire GLQ (étude 5)

	F	*p*
Activités cognitives	1,053	0,397
Activités physiques	2,418	**0,037**[b]
Activités sociales	0,78	0,587
Autres activités de loisirs	0,52	0,795
Autres comportements de santé	0,83	0,547
Score total	0,74	0,619

Note. Les calculs ont été réalisés sur les données transformées logarithmiquement. [b] *: la correction de Brown-Forsythe est appliquée pour corriger l'inégalité des variances.*

Annexe 28. Comparaison post hoc pour l'effet de groupe (étude 5)

		d de Cohen	p
Test de coordination			
AM2C	CON	-0,41	1,000
	JV	0,02	1,000
	EM2I	-0,06	1,000
	SWITCH	-1,19	**0,013**
	VÉLO-JV	-0,85	0,172
	VÉLO	-0,71	0,567
CON	JV	0,44	1,000
	EM2I	0,35	1,000
	SWITCH	-0,78	0,283
	VÉLO-JV	-0,44	1,000
	VÉLO	-0,30	1,000
JV	EM2I	-0,08	1,000
	SWITCH	-1,22	**0,032**
	VÉLO-JV	-0,88	0,283
	VÉLO	-0,74	0,693
EM2I	SWITCH	-1,13	**0,016**
	VÉLO-JV	-0,79	0,217
	VÉLO	-0,65	0,693
SWITCH	VÉLO-JV	0,34	1,000
	VÉLO	0,48	1,000
VÉLO-JV	VÉLO	0,14	1,000
TMT			
AM2C	CON	-0,90	**0,007**
	JV	0,29	1,000
	EM2I	0,09	1,000
	SWITCH	-0,35	1,000
	VÉLO-JV	0,05	1,000
	VÉLO	0,13	1,000
CON	JV	1,19	**< 0,001**
	EM2I	0,99	**0,001**
	SWITCH	0,55	0,513
	VÉLO-JV	0,95	**0,002**
	VÉLO	1,02	**0,002**
JV	EM2I	-0,19	1,000
	SWITCH	-0,64	0,513
	VÉLO-JV	-0,24	1,000
	VÉLO	-0,16	1,000
EM2I	SWITCH	-0,44	1,000
	VÉLO-JV	-0,05	1,000
	VÉLO	0,03	1,000
SWITCH	VÉLO-JV	0,40	1,000
	VÉLO	0,48	1,000
VÉLO-JV	VÉLO	0,08	1,000

Note. *AM2C : Activités Motrices et Cognitives Complexes ; EM2I : Exergames assistés par un Mur Immersif et Interactif ; GC : Groupe Contrôle ; JV : Jeux Vidéo ; SWITCH : exergames assistés par une console de jeux grand public ; TMT : Trail Making Test ; VÉLO-JV : vélo couplé à des jeux vidéo.*