Conception, développement et évaluation d'un exergame personnalisé sur les capacités cognitivo-motrices de séniors : le projet INCOME

Matthieu Gallou-Guyot

▶ **To cite this version:**

Matthieu Gallou-Guyot. Conception, développement et évaluation d'un exergame personnalisé sur les capacités cognitivo-motrices de séniors : le projet INCOME. Sciences cognitives. Université de Limoges, 2022. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-03715392⟩

HAL Id: tel-03715392

https://theses.hal.science/tel-03715392v1

Submitted on 6 Jul 2022

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

Thèse de doctorat

Université de Limoges

Université de Limoges

ED 615 - Sciences Biologiques et Santé (SBS)

Laboratoire HAVAE – UR20217

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
STAPS

Présentée et soutenue par
Matthieu Gallou-Guyot

Le Mardi 21 Juin 2022

Conception, développement et évaluation d'un *exergame* personnalisé sur les capacités cognitivo-motrices de séniors : le projet INCOME

Thèse dirigée par Dr. Stéphane Mandigout, MCF, HDR
et co-dirigée par Pr. Anaïck Perrochon, PR

JURY :

Présidente du jury
Pr. France Mourey, PR, Laboratoire INSERM U1093 - Cognition, Action et Plasticité sensori-motrice, Université de Bourgogne

Rapporteurs
Pr. Cédric Albinet, PR, Equipe d'Accueil 7420 SCOTE - Sciences de la Cognition, Technologie, Ergonomie, Institut National Universitaire Champollion
Pr. Jean-Jacques Temprado, PR, Unité Mixte de Recherche CNRS 7287 - Performance Motrice et modélisation, Université de Marseille

Examinateurs
Pr. Michel Audiffren, PR, Unité Mixte de Recherche CNRS 7295 - Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage, Université de Poitiers

Invitée
Mme. Elisabeth Labbé, Municipalité de Limoges

Licence CC BY-NC-ND 3.0

À toi, apparue dans ma vie tel un second souffle,
Tu m'apportes l'équilibre
- avec tout mon amour.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Si tu diffères de moi, mon frère, loin de me léser, tu m'enrichis.
Antoine de Saint-Exupéry

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Remerciements

Mener à bien ce projet de thèse est le fruit des nombreuses collaborations. Tant de personnes m'ont aidé directement ou indirectement ces trois dernières années ; je leur dois ce travail et j'aimerais profiter de ce clap de fin pour les remercier.

Un film voit le jour grâce à son producteur. Il me semble important de débuter en remerciant l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, ainsi que la municipalité de Limoges, et en particulier le Centre Communal d'Actions Sociales, pour le soutien financier, logistique et humain sans faille qui m'a été fourni.

Ainsi, je remercie la Direction de la Santé et de la Solidarité pour la qualité de leur accueil et de leur intégration au sein du service. Merci à mes collègues Fanny Coulon, Marilyn Ratel-Viroulaud, Sabrina Martin et Stéphane Cheval.

Je remercie également les différentes directions ainsi que les élus qui ont été impliqués ; merci à Bernard Bertin, Guillaume Vidal, Martial Portefaix, Marie-Christine Guiot-Alexis, Paul Brutus, Françoise Archambeaud, Samia Riffaud, Matthieu Parneix et monsieur le Maire Emile-Roger Lombertie.

Puisque Bruce Wayne ne serait rien sans Lucius Fox, je remercie les Ateliers ainsi que le Parc Automobile pour m'avoir tant apporté logistiquement. Je remercie particulièrement Jérôme Faucher pour sa réactivité, lui qui a toujours su me fournir les meilleurs bolides dans les meilleurs délais.

Et puisqu'un bon film ne peut pas se faire sans un bon réalisateur, je remercie le Service de Communication, et particulièrement Alain Druot pour son suivi médiatique.

Sans elles, rien n'aurait été possible : je remercie Karine Benesteve, Corinne Talavera et Martine Roche de m'avoir ouvert en grand les portes de leurs établissements. Merci pour votre gentillesse et tous les moyens que vous m'avez fournis pour mener à bien mon projet. Je remercie également Marie-Line Laubary, Cyrielle Couturaud, Nadine Lambert, Isabelle Vergne et Viviane Senelas pour l'accueil. Je dois maintenant l'avouer, j'ai toujours su faire des photocopies de façon autonome - ce n'était qu'un prétexte pour discuter.

Sans acteurs, pas de film. Il est temps de remercier l'ensemble des résident(e)s des établissements municipaux qui se sont prêtés au jeu avec tant de ferveur.

Je remercie à nouveau et très chaleureusement Natacha Lissajoux, Magalie Massiquet et Olivier Thimoléon, animateurs impliqués dans le projet sans qui l'expérimentation de cette thèse n'aurait tout simplement pas eu lieu.

Je remercie enfin Élisabeth Labbé pour son accompagnement, ses qualités d'encadrement et son humanité, elle qui a su me montrer toutes les portes, me donner toutes les clefs et me fournir toute l'autonomie dont j'avais besoin.

Ces trois années de recherches se sont déroulées dans une joie et une bonne humeur dont je suis encore surpris. Il est ainsi temps de remercier le laboratoire HAVAE et l'ensemble de ses membres pour les conditions de travail idéales qui m'ont été offertes, ainsi que la découverte des coulisses de Limoges. Cet exercice n'est pas facile, tant le nombre de personnes qui m'ont apporté, et la liste de ces apports, sont importants.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Ainsi, je remercie Benoit Borel, Justine Lacroix, Jean-Christophe Daviet, Béatrice Ferry, Joëlle Bonis, Iouri Bernache-Assolant, Mariaconcetta Vinti, Maxence Compagnat, Éric Hermand, Oyene Kossi et David Chaparro pour la qualité de nos échanges scientifiques, leur gentillesse et leur sens de l'humour.

Je remercie l'ensemble des doctorants Axelle Gellineau, Louise Robin, Amine Guediri, Charles Morizio, Geovani Agbohessou, Nathan Grosboillot, Stéphanie Goncalves, Julie Restout et Morgane Le Bourvellec. Merci pour cette compétition sportive et scientifique saine, pour ces déménagements et pour ces gardes de chat.

Je remercie Fanny Thomas pour son implication dans mon projet de thèse et pour m'avoir fait toucher du doigt le vaste champ des sciences humaines et sociales.

Je remercie Patricia Shirley de Almeida Prado pour son aide précieuse, à un moment où j'en avais le plus besoin. Mais aussi et surtout pour Tokyo.

Un bon métrage tient à la qualité de la direction artistique plus que des acteurs. J'ai alors une pensée particulière pour Stéphane Mandigout et Anaïck Perrochon. Il m'est impossible de les remercier suffisamment pour leur encadrement, dont la rigueur scientifique n'avait d'égal que leur bienveillance. Merci d'avoir cru en moi, de m'avoir sélectionné, me permettant de me révéler et de tant progresser. Mais avant tout : merci pour votre humanité et votre gentillesse.

Durant cette thèse, un jeu vidéo a vu le jour, et ce alors que je ne possède aucune compétence en programmation. Je remercie l'école d'ingénieur 3iL, ses étudiants, mais surtout Romain Marie qui a rendu possible la traduction de mes souhaits en lignes de code. Certains parlent encore « d'effets spéciaux ».

Cette thèse est - nous l'espérons - un travail rigoureux. En ce sens, je remercie le Conseil Scientifique et Méthodologique, la Direction de la Recherche et de l'Innovation ainsi que le CEBIMER du CHU de Limoges, et plus particulièrement Julien Magne, Loïc Marais, Sandrine Luce, Fatena Bellahcene, Anaïs Labrunie et Kevin Perine pour leur accompagnement et leur rigueur méthodologique, garante de la qualité de ce travail.

Je remercie également le CHU de Limoges de s'être porté promoteur de notre étude.

Les études de doctorat constituent "une formation à la recherche par la recherche". J'ajouterai un volet de formation à l'enseignement par l'enseignement. Ainsi, je salue les nombreux étudiants stagiaires rencontrés au fil des années et remercie chaleureusement Maxence Bourgeois, Marion Dalmazane, Nina Laplaud et Maelle Dufour, étudiants m'ayant donné la réplique et dont l'accompagnement m'a demandé autant de réflexion qu'il m'a apporté de contenu scientifique.

Je remercie enfin l'ensemble des établissements où j'ai dispensé des cours et accompagné des étudiants durant ma thèse : tous ces échanges m'ont apporté des pistes de réflexion qui ont largement amélioré mes travaux. Merci aux équipes pédagogiques et aux étudiants de l'Université de Limoges, de l'ENKRE, de l'EFOM, du CEERRF, d'Assas, mais surtout de l'APSAH et de l'ILFOMER.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Pour conclure sur le volet scientifique, j'aimerais remercier les professeurs France Mourey, Jean-Jacques Temprado, Cédric Albinet ainsi que Michel Audiffren d'avoir accepté de constituer mon jury de thèse. Merci pour votre temps, ainsi que pour nos échanges passés et à venir.

Merci également à toutes les personnes avec qui j'ai eu l'honneur de pouvoir collaborer ; je pense aux professeurs Marie-Laure Welter, Louis Bherer, Alain Berthoz, ainsi que tous nos co-auteurs.

Enfin, merci mille fois aux cinq "chanceux" qui ont eu à relire mon manuscrit. Le travail de critique est ingrat mais nécessaire.

D'autres personnes ont été impliquées durant ma thèse, bien au-delà des frontières de Limoges.

Débutons par ceux avec qui tout a commencé. Je remercie mes parents, dont le soutien psychologique et logistique n'a jamais failli. Je les remercie surtout pour m'avoir donné le goût de la curiosité dès mon plus jeune âge, m'amenant des années plus tard à la recherche. Merci de m'avoir toujours laissé libre de sortir des sentiers battus.

Je remercie mes deux frères, Thomas et Pierre, qui m'enrichissent tous les jours par nos différences et me poussent à donner le meilleur de moi-même. Je ne pourrai rêver de meilleures relations.

Je remercie Marion d'avoir métamorphosé Thomas puis de nous avoir permis de rencontrer Sacha, cet horizon d'espoirs.

J'ai une pensée émue pour mes grands-parents, mes premiers spectateurs, dont les noms respectifs sont dorénavant affichés dans un cadre académique ; et pour Nath au timing parfait.

Je remercie l'ensemble de mes amis, dont les lignes de vie variées me gardent les pieds sur terre, et dont le sens de la fête me maintient l'esprit élevé. Bonne St Giles à Bobby, Soon, Plicho, Venta, Vilmer, Prins, Wil, Isk, Glo, Joul, Lasol, Flo, Mao, Tokam, Stan, Mama, Céleste, Étienne, Imbert, Chris, Pallut, Camille & LaSchool, Patou, Elsa, Virgile et tous les autres (je commence à manquer de place).

Parmi tous ces énergumènes, je remercie en particulier Peyo pour ses nombreux cours particuliers sur Excel comme aux platines.

Après ce long générique, j'ai une pensée particulière pour Alex, qui aura pris l'Intercité Paris-Limoges plus fréquemment que le métro depuis 2019. Merci pour ton amitié ces vingt dernières années.

Grâce à une régie de grande qualité, la rédaction de ce manuscrit s'est faite dans des conditions particulièrement agréables. Je remercie le site Arsenal de la BNF, mais surtout Empowill et toute son équipe pour l'accueil, de la qualité des sièges à l'intensité du chauffage.

Je remercie Ponfier, mon félin colocataire à la présence discrète, mais au soutien indéfectible.

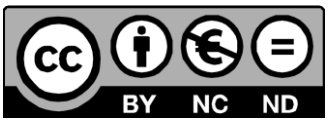
Mes derniers mots vont à Naomi, pour tout ce qu'elle m'apporte. Ou plus simplement pour tout ce qu'elle est.

ありがと, תודה, Merci.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Droits d’auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :
« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »
disponible en ligne : *http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/*



Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des matières

1.1. En lien direct avec les travaux de thèse 16
1.1.1. Revues internationales impactées et indexées 16
1.1.2. Revues internationales non impactées ou indexées 16
1.1.3. Preprints 16
1.2. En lien indirect avec les travaux de thèse 16
1.2.1. Revues internationales impactées et indexées 16
1.2.2. Actes de congrès 17
1.2.3. Chapitre d'ouvrage 17
Introduction 18
1. Effets du vieillissement sur les capacités cognitives et motrices 21
1.1. Qu'est-ce que le vieillissement ? 21
1.2. Le vieillissement cognitif 22
1.2.1. Physiologie du vieillissement cognitif 22
1.2.2. Conséquences du vieillissement cognitif 23
1.3. Vieillissement moteur 26
1.3.1. Physiologie du vieillissement moteur 26
1.3.2. Conséquences du vieillissement moteur 27
1.4. Vieillissement et doubles tâches (DT) 29
1.4.1. Paradigme de DT 29
1.4.2. Concept d'interférence cognitivo-motrice (ICM) 30
1.4.3. Différents paramètres en situation de DT et conséquences sur l'ICM 33
1.4.4. Conséquences du vieillissement sur les capacités de DT 35
Résumé de la Partie 1 36
2. Effets des entraînements cognitifs et moteurs 37
2.1. Effets des entraînements cognitifs 37
2.1.1. Effets des entraînements cognitifs sur les fonctions cognitives 37
2.1.2. Effets des entraînements cognitifs sur les fonctions motrices 38
2.1.3. Effets des entraînements cognitifs sur des déterminants de la qualité de vie 39
2.1.4. Adhérence aux entraînements cognitifs 39
2.2. Effets des entraînements moteurs 40
2.2.1. Effets des entraînements moteurs sur les fonctions motrices 40
2.2.2. Effets des entraînements moteurs sur les fonctions cognitives 41
2.2.3. Effets des entraînements moteurs sur des déterminants de la qualité de vie 42
2.2.4. Adhérence aux entraînements moteurs 42
2.3. Effets des entraînements en DT 43
2.3.1. Effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives 44
2.3.2. Effets des entraînements en DT sur les capacités motrices 45
2.3.3. Effets des entraînements en DT sur les capacités de DT 46
2.3.4. Effets des entraînements en DT sur des déterminants de la qualité de vie 48
2.4. Différentes formes d'entraînements en DT 49
Résumé de la Partie 2 51
3. Les *exergames* 52
3.1. Définition des *exergames* 52
3.2. Efficacité des *exergames* 54
3.2.1. Effets des *exergames* sur les capacités cognitives 54

Licence CC BY-NC-ND 3.0

3.2.2. Effets des *exergames* sur les capacités motrices 55
3.2.3. Effets des *exergames* sur les capacités de DT 56
3.2.4. Effets des *exergames* sur des déterminants de la qualité de vie....58
3.2.5. Sollicitation et efficacité des *exergames* 59
3.3. Intérêts spécifiques des *exergames* 60
3.3.1. L'attractivité des *exergames* 60
3.3.2. La malléabilité des *exergames* 62
Résumé de la Partie 3 63
4. Problématique 64
5. Conceptualisation et développement de l'*exergame* 66
5.1. Recommandations pour la construction *d'exergames* 66
5.1.1. Recommandations sur le fond 66
5.1.2. Recommandations sur la forme 67
5.2. Conceptualisation et développement de l'*exergame* 68
5.3. Fonctionnement et règles de l'*exergame* 71
5.3.1. Interfaces de jeu 71
5.3.2. Exercices proposés 73
Résumé de la Partie 5 75
6. Pré-étude transversale : Comparaison de l'intensité physique des séances lors de sessions d'entraînement en ST, en DT et via l'*exergame* chez des sujets jeunes et sains ...76
6.1. Objectifs 76
6.1.1. Objectif principal 76
6.1.2. Objectif secondaire 76
6.2. Méthode 76
6.2.1. Participants 76
6.2.2. Procédure 77
6.2.3. Critères de jugement 79
6.2.4. Analyse statistique 80
6.3. Résultats 80
6.3.1. Statistiques descriptives 80
6.3.2. Statistiques analytiques 81
6.4. Discussion 82
6.4.1. Intensité physique 83
6.4.2. Limites 83
6.4.3. Études futures 84
Résumé de la Partie 6 84
7. Étude principale pilote longitudinale : Effets de 12 semaines d'entraînement en DT via un *exergame* centré sur l'ICM sur les capacités cognitives, motrices et de DT de personnes âgées 85
7.1. Objectifs 85
7.1.1. Objectif principal 85
7.1.2. Objectifs secondaires 85
7.2. Méthode 85
7.2.1. Participants 86
7.2.1.1. Éligibilité 86
7.2.1.2. Recrutement 86
7.2.1.3. Taille de l'effectif 86

Licence CC BY-NC-ND 3.0

7.2.2. Procédure....87
7.2.2.1. Conception et paramètres d'étude....87
7.2.2.2. Programme d'entraînement....87
7.2.3. Critères de jugement....89
7.2.3.1. Critère de jugement principal....89
7.2.3.2. Critères de jugement secondaires....89
7.2.4. Analyse statistique....91
7.2.5. Éthique....91
7.3. Résultats....92
7.3.1. Statistiques descriptives....92
7.3.2. Statistiques analytiques....93
7.3.2.1. Résultat principal....93
7.3.2.2. Résultats secondaires....94
7.3.2.3. Analyse complémentaire exploratoire qualitative....98
7.4. Discussion....101
7.4.1. Échantillon d'étude....101
7.4.2. Efficacité de notre *exergame*....102
7.4.2.1. Capacités de DT....102
7.4.2.2. Proposition de modèle d'évolution de l'ICM....105
7.4.2.3. Capacités cognitives....107
7.4.2.4. Capacités motrices....108
7.4.2.5. Modifications de comportement....110
7.4.3. Attractivité de notre *exergame*....111
7.4.4. Période de suivi et effet global de l'intervention....112
7.4.5. Limites....113
7.4.6. Perspectives....114
Résumé de la Partie 7....116
8. Étude qualitative 1 : Retour d'expérience des participants....117
8.1. Objectifs....117
8.2. Méthode....117
8.2.1. Participants....117
8.2.2. Procédure....117
8.2.3. Analyse....118
8.3. Résultats....118
8.3.1. L'esthétique au second plan....118
8.3.2. La place centrale des animateurs....118
8.3.3. L'interface et les temps morts....119
8.3.4. À l'usage....119
Résumé de la Partie 8....120
9. Étude qualitative 2 : Retour d'expérience des animateurs....121
9.1. Objectifs....121
9.2. Méthode....121
9.2.1. Participants et procédure....121
9.2.2. Analyse....121
9.3. Résultats....122
9.3.1. Accueil par les résidents selon les animateurs....122
9.3.2. Retour d'expérience sur l'utilisation du dispositif par les animateurs....123

Licence CC BY-NC-ND 3.0

9.3.3. À l'avenir 123
Résumé de la Partie 9 124
10. Conclusion générale 126
10.1. Rappel du contexte et de l'objectif de thèse 126
10.2. Réponse à la question de recherche 126
10.3. Étapes, forces et originalité de ce projet de recherche 127
10.4. Suites de cette étude 128
Références bibliographiques 130
Documentation supplémentaire en ligne 156
Annexes 157

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des illustrations

Figure 1 : Physiologie du vieillissement cognitif et conséquences fonctionnelles – inspirée et complétée depuis une publication (46) 25

Figure 2 : Physiopathologie et conséquences fonctionnelles du vieillissement moteur 28

Figure 3 : Illustration de la théorie de concurrence entre les domaines expliquant l'ICM (88) 30

Figure 4 : Illustration de la théorie du goulot d'étranglement expliquant l'ICM (88) 31

Figure 5 : Illustration de la théorie de la priorisation de la tâche expliquant l'ICM (88) 31

Figure 6 : Différents scénarios possibles des conséquences de l'ICM sur les performances en DT (96) 32

Figure 7 : Modèles théoriques actuels de l'ICM (84) 33

Figure 8 : Variations de difficulté des DT et conséquences sur les performances (100) 34

Figure 9 : Intérêt potentiel des entraînements en DT 44

Figure 10 : Résumé des effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives, physiques et de DT chez les séniors (184) 48

Figure 11 : Déclin des capacités motrices, cognitives et de DT avec l'âge, et l'effet des entraînements – adapté du modèle « 1 + 2 + 3 » de Bouchon (213) 51

Figure 12 : Nomenclature autour des jeux, qu'ils soient vidéo, d'exercice, sérieux, immersifs, commerciaux, ou non – illustrations issues de travaux (215,218,219) 53

Figure 13 : Différentes formes possibles d'*exergames* – illustrations issues de travaux (221–223) 54

Figure 14 : Résumé des effets des *exergames* sur les capacités cognitives, physiques et de DT chez les séniors (184) 57

Figure 15 : Effets des *exergames* chez les séniors et hypothèses neurobiologiques – traduit et complété depuis une publication (232) 59

Figure 16 : Continuum de l'autodétermination selon Deci et Ryan (280) 61

Figure 17 : Le « Tapis Virtuel », constitué de l'association entre un vidéoprojecteur (1), ainsi que les caméras (2) et traqueurs (3) HTC Vive ® - illustration issue d'une publication (299) 68

Figure 18 : Fonctionnement de l'interaction entre les participants et l'*exergame* 69

Figure 19 : Calibrage de l'*exergame* 70

Figure 20 : Dispositif de l'*exergame* en utilisation réelle - illustration issue d'une publication (299) 71

Figure 21 : Les différentes interfaces de l'*exergame* disposées au sol pour les joueurs (1-3) ou sur l'écran de l'animateur (4) 72

Figure 22 : QR code renvoyant vers une vidéo de présentation du dispositif de jeu 75

Figure 23 : Différences entre les séances d'entraînement via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST) 79

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 24 : Déroulé de la pré-étude évaluant l'intensité des séances d'entraînement via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST) 79

Figure 25 : Différence de FC moyenne (A), FC maximale (B) et intensité de l'effort ressenti (C) en fonction du type d'entraînement réalisé (EG, DT ou ST) 82

Figure 26 : Déroulé de l'étude pilote longitudinale 87

Figure 27 : Réalisation d'un exercice de passage du pas incluant de l'inhibition mentale par deux participantes 88

Figure 28 : QR code renvoyant vers une vidéo de démonstration du protocole du projet INCOME 89

Figure 29 : Diagramme de flux des participants à l'étude pilote longitudinale 93

Figure 30 : Différence de vitesse d'oscillation (en $mm.s^{-1}$) lors de la réalisation d'une tâche cognitive concomitante avant (T1) et après (T2) 3 mois d'entraînement 93

Figure 31 : Effet de la DT (*dual task effect* DTE) sur les performances cognitives et motrices à T1 et T2 98

Figure 32 : Impact de l'entraînement sur l'effet de la DT – 4 types de modifications de l'ICM (A, B, C et D) (n = 33) 100

Figure 33 : Modèle de représentation de l'évolution de l'ICM, ou évolution de l'effet de la DT (DTEv cognitif / moteur) 106

Figure 34 : Transposition motrice de l'ICM (DTEv +/-) illustrée dans tous les scénarios d'effet de DT (DTE) selon le modèle de Plummer 107

Figure 35 : Différence entre bénéfices, effets et progression dans un contexte gériatrique – inspiré du modèle « 1 + 2 + 3 » de Bouchon (213) 109

Figure 36 : Exemple d'*exergame* au concept proche du notre utilisé chez une autre population (379) 115

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des tableaux

Tableau 1 : Différentes modalités d'entraînements en DT 50

Tableau 2 : Description et illustration des 3 types d'exercices proposés dans notre *exergame* 74

Tableau 3 : Détails des exercices proposés durant les 3 types d'entraînements : *exergame* (EG), doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou simple tâche motrices (ST) 78

Tableau 4 : Caractéristiques des participants à l'étude transversale (N = 16).....80

Tableau 5 : FC moyenne, FC maximale et score de l'échelle de Borg suivant le type d'entraînement - via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST).....81

Tableau 6 : Critères de jugement secondaires de l'étude pilote longitudinale 91

Tableau 7 : Caractéristiques des participants à l'étude longitudinale (N = 39) 92

Tableau 8 : Valeurs moyennes ou médianes des mesures à T1, T2 et T3.....96

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Liste des abréviations

3iL : Institut d'ingénierie informatique de Limoges

AGGIR : autonomie gérontologie groupes ISO-ressources

BDNF : *brain derived neurotrofic factor*

BBS : *Berg balance scale*

Bpm : battements par minute

CHU : centre hospitalo-universitaire

CIFRE : convention industrielle de formation par la recherche

DT : doubles tâches cognitivo-motrices

DTE : *dual task effect*

EQ5D5L : questionnaire EuroQol 5 dimensions 5 niveaux

EMAPS : échelle de motivation pour l'activité physique à des fins de santé

fNIRS : *functional near-infrared spectroscopy*

HAVAE : Handicap, Activité, Vieillissement, Autonomie, Environnement

ICM : interférence cognitivo-motrice

IGF-1 : *insulin-like growth factor*-1

IMC : indice de masse corporelle

INCOME : interférence cognitivo-motrice exercice

INSEE : institut national de la statistique et des études économiques

FC : fréquence cardiaque

FES-I : *falls efficacy scale international*

MET : *metabolic equivalent task*

OMS : organisation mondiale de la santé

QAPPA : questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées

RAM : résidence autonomie municipale

SMD : *sandardized mean deviation*

ST : simple tâche

TMT : *trail making test*

TUG : test du *timed up-and-go*

VEGF : *vascular endothelial growth factor*

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Liste des publications

Cette thèse a fait l'objet de publications ou communications scientifiques en lien direct ou indirect avec les travaux menés. L'ensemble de ces valorisations est présenté ici.

1.1. En lien direct avec les travaux de thèse

1.1.1. Revues internationales impactées et indexées

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* (IF = 10.616, Q1). https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101135

1.1.2. Revues internationales non impactées ou indexées

Gallou-Guyot M., Mandigout S., Almeida-Prado P.S., Marie R., Daviet J.C., Perrochon A. (2022). Exergame and cognitive-motor dual-task training in the healthy elderly (INCOME): a study protocol. *European Rehabilitation Journal*. https://doi.org/10.52057/erj.v2i1.8

Gallou-Guyot M., Perrochon A., Thomas F., Mandigout S. (2021). Réentrainer les séniors à faire deux choses à la fois : le projet INCOME. *Revue TraHs* n°11. DOI: https://doi.org/10.25965/TRAHS.3945

1.1.3. Preprints

Gallou-Guyot M., Perrochon, A., Marie, R., Bourgeois, M., Mandigout S. (2022). Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study (Preprint). *JMIR Preprints*. https://doi.org/10.2196/preprints.36126

1.2. En lien indirect avec les travaux de thèse

1.2.1. Revues internationales impactées et indexées

Gallou-Guyot, M., Nuic, D., Mandigout, S., Compagnat, M., Welter, M.-L., Daviet, J.-C., & Perrochon, A (2022). Effectiveness of home-based rehabilitation using active video games on quality of life, cognitive and motor functions in people with Parkinson's disease: a systematic review. *Disability and Rehabilitation* (IF = 3.033, Q1). https://doi.org/10.1080/09638288.2021.2022780

Dalmazane, M., **Gallou-Guyot, M.**, Compagnat, M., Magy, L., Montcuquet, A., Daviet, J.-C., & Perrochon, A. (2021). Effects on gait and balance of home-based active video game interventions in persons with multiple sclerosis: A systematic review. *Multiple Sclerosis and Related Disorders* (IF = 2.889, Q2). https://doi.org/10.1016/j.msard.2021.102928

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Kronovsek, T. Hermand, E., Berthoz, A., Castilla, A., **Gallou-Guyot, M.**, Daviet, J.-C., & Perrochon, A. (2020). Age-related decline in visuo-spatial working memory is reflected by dorsolateral prefrontal activation and cognitive capabilities. *Behavioural Brain Research* (IF = 2.977, Q2). https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112981

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Combourieu-Donnezan, L., Bherer, L. & Perrochon, A. (2020). Cognitive and physical impact of cognitive-motor dual-task in cognitively impaired older adults: an overview. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology* (IF = 2.553, Q2). https://doi.org/10.1016/j.neucli.2020.10.010

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Lacroix, J., Ricard, D., Buffat, S., Archambeau, D., Guéguin, G., & Perrochon, A. (2020). Biopsychosocial determinants of visuospatial memory performance according to different spaces. *Neuroscience Research* (IF = 2.645, Q1). https://doi.org/10.1016/j.neures.2020.07.012

1.2.2. Actes de congrès

Gallou-Guyot, M., Lacroix, J., Goyat, V., Mandigout, S., & Perrochon, A. (2019). Effets d'un programme d'activité physique en double-tâche sur différentes composantes de double-tâche. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, *49*(6), 422. https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.10.045

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Lacroix, J., Buffat, S., Archambeau, D., Guéguin, G., & Perrochon, A. (2019). Déterminants biopsychosociaux des performances de mémoire visuospatiale selon l'espace. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, *49*(6), 436. https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.10.082

1.2.3. Chapitre d'ouvrage

Gallou-Guyot, M., & Quijoux, F. (2022). Neurophysiologie du vieillissement : Du cognitif à la chute. In A. Pallot (Ed.), Rééducation en neurologie : Eléments pour une pratique clinique raisonnée (Elsevier Masson, pp. 488–498). Elsevier Health Sciences. ISBN: 978-2-294-77123-1

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Introduction

Le vieillissement n'est pas un état figé mais un processus qui évolue dans le temps. Il est défini et caractérisé par une perte progressive des fonctions et des capacités, appliquée à l'ensemble des systèmes du corps humain. L'avancée en âge est accompagnée d'une perte progressive des capacités et d'une altération des fonctions cognitives et physiques : diminution de l'attention, des capacités mnésiques, des fonctions exécutives, de la vitesse de traitement de l'information, mais aussi du volume et de la force musculaire, de l'équilibre postural, de la mobilité ou de la souplesse (entre autres). L'altération de ces différentes fonctions constitue autant de facteurs de risques de chute, et donc de risque de dégradation de l'autonomie et de la qualité de vie chez les séniors.

Ces pertes de capacités cognitives et motrices impactent également l'aptitude des séniors à réaliser deux choses simultanément : nous parlons de situation de doubles tâches, ici cognitivo-motrice. La réalisation d'une tâche demande un certain niveau d'attention, aussi appelé coût attentionnel. Lors de la réalisation d'une double tâche par une personne âgée, un dépassement des capacités attentionnelles appelé interférence cognitivo-motrice est fréquemment observé, avec pour résultante une diminution de performance dans l'exécution de l'une ou des deux tâches. Lorsque la tâche impactée est cognitive, les conséquences sont sans gravité (exemple : le *stop talking when walking*). Mais si la tâche impactée est motrice, alors nous rencontrons un facteur de risque de chute supplémentaire chez les séniors, comme l'altération de l'équilibre postural ou de la marche, par exemple. Ceci est particulièrement important, car la majorité des actions de la vie courante nécessitent la réalisation de deux tâches simultanées.

Il est donc important pour les séniors de maintenir leurs capacités cognitives, motrices ainsi que de doubles tâches dans une stratégie de lutte contre les facteurs de risques de chutes et le maintien de l'autonomie et de la qualité de vie. Si le vieillissement est irréversible, inéluctable, souvent pathologique, quasi systématiquement symptomatologique, il peut tout de même être freiné. Pour ce faire, nous avons la possibilité de passer par l'entraînement. Effectivement, nous savons depuis de nombreuses années que l'entraînement physique a un impact positif sur les capacités physiques et motrices chez les âgés, et que l' entraînement cognitif est efficace sur les fonctions cognitives. Il a également été observé que l'entraînement physique avait des effets bénéfiques sur les fonctions cognitives, probablement par le biais de l'augmentation de l'oxygénation cérébrale. À l'inverse, certains entraînements cognitifs entraîneraient des conséquences positives sur les fonctions motrices via la sollicitation de l'imagerie motrice. Enfin, les entraînements physiques comme cognitifs ont des effets bénéfiques sur la santé mentale et la qualité de vie des séniors. Il a donc été proposé de combiner les modalités d'entraînements, et il semble que la réalisation simultanée d'une tâche cognitive et d'une tâche motrice permette d'atteindre des effets supérieurs à un programme travaillant les deux tâches isolées chez les séniors.

Toutefois, les entraînements physiques souffrent de différentes barrières concernant la volonté des personnes à débuter l'entraînement (adhésion), à le respecter (compliance), à réaliser l'ensemble des séances (réalisation) et enfin à aller jusqu'à son terme (complétion) ; ceci est également vrai chez les séniors. Heureusement, il existe un certain nombre de leviers dont nous pouvons nous servir pour inciter le maintien d'activités physiques. Les « *exergames* » pourraient permettre d'appliquer un certain nombre de ces leviers. Les *exergames* (pour *exercise games*) correspondent à une certaine forme de jeux sérieux. Ce sont des jeux qui

Licence CC BY-NC-ND 3.0

nécessitent une activité physique de la part du joueur pour être pratiqués, comme la Nintendo® Wii ou à la Microsoft® Kinect. Ces *exergames* sont vus comme ludiques et amusants, et permettent ainsi un bon engagement des personnes dans leurs programmes d'entraînement. De plus, la liberté sur la forme et le fond des *exergames* permet de coller aux exigences et aux besoins spécifiques des âgés (jeu en groupe, collaboratif, facile d'accès, etc.). Ceci est constaté avec l'essor des « nouvelles technologies » déployées dans l'économie des séniors (ou *silver economy*).

Dans le cadre du projet INCOME (*INterférence COgnitivo-Motrice Exercise*), nous avons conçu et développé un entraînement reposant sur un *exergame* répondant à ces impératifs. Sur le fond d'abord, en privilégiant l'entraînement des fonctions cognitives et motrices impliquées comme facteurs de risque de chute, le tout en doubles tâches simultanées – fonctions exécutives, vitesse de réaction et de traitement de l'information, force musculaire, mobilité, équilibre postural. Sur la forme ensuite, en conceptualisant et en développant un jeu vidéo actif de type *exergame* pensé autour de recommandations issues de la littérature (jeu collectif, non pénalisant, aux règles simples, etc.). Ce jeu reprend le patrimoine culturel de la Ville de Limoges afin d'en renforcer l'attractivité pour des séniors résidents de la ville.

L'objectif principal de cette thèse était de concevoir et développer un *exergame*, puis d'en étudier les effets sur les capacités cognitives et motrices des séniors participants. Pour ce faire, nous avons réalisé deux études. Dans la première, nous avons analysé le niveau d'intensité physique que représente notre entraînement en doubles tâches cognitivo-motrices ayant pour support l'*exergame*, car nous savons que le niveau d'efficacité de ces entraînements dépend en partie du niveau de difficulté. Notre seconde étude était une étude pilote en simple bras longitudinale étudiant les effets de notre jeu suivant nos critères de jugement, à court (12 semaines) et moyen (24 semaines) termes. Nous étudions l'impact de 12 semaines d'entraînement via notre *exergame* sur les fonctions cognitives, motrices et de doubles tâches des participants, mais aussi sur leur niveau d'activité physique, de motivation, de peur de tomber et de qualité de vie. Nous étudions également les caractéristiques de l'intervention telles que le niveau d'adhésion, de réalisation, de complétion et de sécurité. Nous avons recruté nos participants au sein de résidences autonomie municipales.

Les premières retombées sont d'ordre scientifique : explorer un manque de connaissances actuel dans la littérature concernant l'efficacité, l'adhésion et la sécurité des *exergames* personnalisés comme moyen d'entraînement chez les séniors – les précédentes études portant sur ces sujets étant hétérogènes et leurs conclusions variées. L'originalité et la nouveauté importantes de ce programme résident dans l'utilisation d'une scène projetée permettant une interface à haut niveau d'interaction et d'immersion dans le jeu, reproduisant des environnements identifiables (ici, le patrimoine de la Ville de Limoges). Modulable, ceci permet facilement de s'adapter aux besoins et proposer des variations facilement. Une autre conséquence possible est de favoriser le lien social en tout temps, car le dispositif final sera facilement accessible aux résidents, et pourra être utilisé par les animateurs des résidences municipales comme un jeu de société.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Etat de l’art

Licence CC BY-NC-ND 3.0

1. Effets du vieillissement sur les capacités cognitives et motrices

La population mondiale vieillit, et cette avancée en âge entraîne une nouvelle préoccupation de santé publique : est-il possible de vieillir tout en restant en bonne santé ? De cette interrogation est né ces dernières années le concept d'espérance de vie en bonne santé. Cet indicateur renvoie à la notion de « bien vieillir », c'est-à-dire retarder le plus possible l'arrivée à un seuil de dépendance tout en conservant son niveau de qualité de vie. Rester autonome passe par un maintien des capacités fonctionnelles, reposant entre autres sur des fonctions tant cognitives que motrices.

Dans cette première partie, nous définirons ce qu'est le vieillissement, puis aborderons les effets du vieillissement sur les capacités cognitives et motrices ainsi que sur la qualité de vie d'un point de vue physiologique et fonctionnel.

1.1. Qu'est-ce que le vieillissement ?

Le vieillissement est un ensemble de processus physiologiques et psychologiques. Il est défini par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme une progression lente, normale et inéluctable altérant l'ensemble des systèmes constituant le corps humain (1). Cette progression est aussi appelée sénescence.

Le phénomène de vieillissement s'explique par des causes internes et externes à l'individu, qui sont intriquées (2). D'une manière générale, nous pouvons parler d'une programmation génétique et biologique sous influence de paramètres extérieurs. Les facteurs intrinsèques comprennent la détérioration du patrimoine génétique, les lésions oxydatives ainsi que la glycation des protéines. Ces facteurs intrinsèques vont être influencés dans un sens ou un autre par l'alimentation, les pathologies, mais aussi la sédentarité ou l'activité physique. Nous nous intéresserons particulièrement à ces deux derniers facteurs.

Il est important de saisir l'importance du vieillissement de la population du point de vue de la santé publique. Selon le Ministère des Solidarités et de la Santé en 2018, l'espérance de vie a connu un allongement continu ces dernières décennies, et les projections se poursuivent en ce sens. Ainsi, l'espérance de vie actuelle est de 78.4 ans pour les hommes et 84.8 ans pour les femmes, et devrait passer à 86 et 91.1 ans respectivement d'ici à 2060, faisant passer le nombre de personnes de plus de 60 ans en France de 15 millions en 2020 à 20 millions en 2030. Ce phénomène n'est pas propre à la France mais concerne le monde entier.

Ainsi, les personnes vivent globalement toujours plus longtemps. Toutefois, cette dernière partie de la vie qui s'allonge ne se déroule pas nécessairement en bonne santé. Ceci renvoie au concept d' « espérance de vie en bonne santé », estimée en France à 63.7 ans pour les hommes et 64.6 ans pour les femmes selon l' Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) en 2019. Ce décalage de 15 à 20 ans entre « espérance de vie » et « espérance de vie en bonne santé » met en lumière une certaine fragilité de la population vieillissante, ainsi qu'un risque accru de passer sous le seuil de dépendance[1].

[1] La dépendance est un état durable entraînant des incapacités et requérant des aides pour réaliser des actes de la vie quotidienne. Le degré de dépendance d'une personne dépend du niveau des limitations fonctionnelles et des restrictions d'activité qu'elle subit, et non directement de son état de santé, bien que la frontière entre les deux soit poreuse.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Il existe donc un enjeu fort cherchant à augmenter l'espérance de vie en bonne santé : c'est ce que nous appelons le « bien vieillir », concept apparu il y a plus de 50 ans (3). Le terme actuellement usité est « vieillissement actif » (ou *active aging*), défini par l'OMS comme un processus d'optimisation de la santé, de la participation et de la sécurité des personnes vieillissantes afin d'améliorer leur qualité de vie (4). De nombreuses recherches sont menées en ce sens afin de retarder l'arrivée des personnes au seuil de dépendance (5–7). Ceci passe par le maintien des capacités fonctionnelles afin de maintenir l'autonomie et donc la qualité de vie, reposant entre autres choses sur les fonctions cognitives et motrices. Chez les séniors, ceci concerne essentiellement la prévention des chutes et le maintien de la mobilité, les chutes étant la première cause de décès traumatique chez les séniors en 2018 selon l'OMS.

La qualité de vie est définie par l'OMS en 1993 comme « la perception qu'un individu a de sa place dans la vie, dans le contexte de la culture et du système de valeurs dans lequel il vit, en relation avec ses objectifs, ses attentes, ses normes et ses inquiétudes. C'est un concept très large qui peut être influencé de manière complexe par la santé physique du sujet, son état psychologique et son niveau d'indépendance, ses relations sociales et sa relation aux éléments essentiels de son environnement ». Cette définition nous indique que la qualité de vie repose sur un ensemble de critères différents, dépendant de nombreuses variables qui peuvent être intriquées entre elles.

1.2. Le vieillissement cognitif

Le terme « cognitif » renvoie à la faculté de connaître, et regroupe les processus mentaux qui se rapportent à la connaissance. Ainsi, les fonctions cognitives permettent la réception, la sélection, le stockage, la transformation, l'élaboration et la récupération d'informations que nous recevons de l'extérieur. Ces fonctions cognitives regroupent le langage, l'attention, la perception, la mémoire, mais également les fonctions exécutives.

1.2.1. Physiologie du vieillissement cognitif

Avec l'âge, nous observons une diminution du volume du cerveau (8,9). Ceci s'explique par une réduction du nombre de synapses, ainsi que du nombre et de la taille des dendrites, et non une perte de neurones (10). Ainsi, l'atrophie cérébrale des séniors n'est pas due à une diminution du nombre de neurones, mais au fait qu'ils deviennent plus petits et moins ramifiés, impactant la connectivité neuronale (11).

Il apparait également une accumulation de filaments de protéines *tau* (pour *tubul associated unit)* avec le temps, débutant dès 20 ans et constamment observée à partir de 80 ans (2). Cette protéine *tau* a pour rôle biologique la stabilisation des microtubules axonaux, mais son accumulation impacte de nombreux systèmes de neurotransmetteurs. Les neurotransmetteurs permettent la communication entre les neurones, et leurs fonctions sont variées (10) : acétylcholine (mémoire, apprentissage), catécholamines dont dopamine (mobilité, attention) et noradrénaline (attention, apprentissage), ou encore sérotonine (neuroplasticité). Nous observons également un déclin des niveaux de neurotrophines, telles que le BDNF (*brain derived neurotrofic factor*) (12,13). Les neurotrophines impactent le métabolisme neuronal, en influençant la survie et la différenciation des neurones.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

En parallèle se produit l'apparition de plaques séniles extracellulaires, qui induisent une inflammation des neurones proches, aboutissant à leur mort. Si ce phénomène est la caractéristique de la maladie d'Alzheimer, il est observable dans la population vieillissante dite normale – à savoir non pathologique (14).

Nous observons également une réduction du flux sanguin chez les personnes âgées due à des pertes de vascularisation (15,16). Cette réduction du débit sanguin cérébral serait en lien direct avec la diminution du métabolisme cérébral (17) et donc des dysfonctions liées à l'âge (18). En parallèle, le vieillissement s'accompagne d'une augmentation de la neuroinflammation chronique (19,20). Cette neuroinflammation renforce le stress oxydatif, qui est délétère pour l'ADN mitochondrial et cellulaire, et est un facteur de risque majeur de développement de pathologies neurodégénératives telles que les maladies de Parkinson ou d'Alzheimer (21).

1.2.2. Conséquences du vieillissement cognitif

Les études menées chez les séniors ont montré une diminution des performances de mémoire (22), de vitesse de traitement et de fonctionnement exécutif (23) avec l'avancée en âge. Trois théories expliquent ce déclin cognitif : l'hypothèse du ralentissement généralisé, avec une baisse de la vitesse de traitement des informations ; l'hypothèse de la baisse des capacités de mémoire de travail ; et enfin l'hypothèse du contrôle exécutif, avec un déclin des capacités d'inhibition lors de la sélection des informations en mémoire de travail. C'est cette dernière hypothèse que nous retiendrons, car elle implique les fonctions exécutives, particulièrement impactées par le vieillissement (24,25).

Effectivement, le vieillissement cognitif atteint l'ensemble du cortex d'une manière inégale. Dans le vieillissement dit normal, c'est-à-dire hors pathologie neurologique, nous observons une atteinte préférentielle du cortex préfrontal (26,27). Or, les fonctions exécutives sont anatomiquement liées au lobe frontal (28,29). Il n'est ainsi pas surprenant d'observer une atteinte majeure des fonctions exécutives (24,25), de la mémoire de travail (30,31) ainsi que des capacités attentionnelles, de concentration et la vitesse de traitement des données (32), en lien avec les fonctions exécutives.

Les fonctions exécutives sont un ensemble de processus cognitifs de haut niveau permettant en continu le traitement de l'information, et l'adaptation qui en découle. Ceci est résumé dans le modèle de Miyake et al. (33) qui résume les fonctions exécutives comme la capacité à déplacer l'attention entre les tâches, à manipuler l'information, et à stopper des réactions automatiques. Les fonctions exécutives regroupent ainsi la mémoire de travail, la flexibilité mentale, l'inhibition mentale et la mise à jour (33), ainsi que l'attention pour certains auteurs (34). La mémoire de travail est un modèle du fonctionnement de la mémoire à court terme, permettant le traitement et la manipulation d'informations. La flexibilité mentale est la capacité à changer de tâche, à se désengager d'une tâche pour se réengager dans une autre lors du passage entre opérations cognitives. L'inhibition mentale est la capacité à ne pas considérer une information, ou ne pas réagir à un réflexe cognitif en supprimant l'expression face à une information. La mise à jour est la modification du contenu d'informations en mémoire de travail. Enfin, l'attention est la capacité à rester concentré, fixé, consacré à une tâche ; elle se subdivise en attention soutenue, sélective ou partagée. L'attention est un concept difficile à définir (35), qui permet globalement à l'individu de traiter l'information en étant transversale aux autres fonctions exécutives. Représentant l'aspect sélectif de la perception et de la

Licence CC BY-NC-ND 3.0

réponse ainsi que de leur priorisation (36), elle rendrait les autres processus cognitifs possibles (37).

Le déclin des fonctions cognitives a un impact au-delà de ces fonctions, avec pour exemple un lien entre déclin cognitif et anxiété durant le vieillissement (38). Dans une étude longitudinale observationnelle auprès de plus de 1000 personnes âgées, Paterniti et al. se sont intéressés au lien entre déclin cognitif et dépression sur des périodes de suivi de 2 et 4 ans (39). Les résultats sont qu'un état dépressif lors de l'évaluation initiale est prédictif d'un déclin cognitif plus important en vieillissant, quel que soit le sexe ou l'âge de l'individu. Ceci peut s'expliquer d'un point de vue physiologique par la sécrétion de glucocorticoïdes plus importante en cas de dépression (40), menant à une atrophie hippocampique (41). Mais Paterniti et al. proposent un lien allant dans les deux sens, la dépression pouvant être la manifestation précoce d'une dégradation cognitive, avec des aires cérébrales similaires atteintes (42). Une dernière piste envisagée est psychologique, avec un retentissement sur l'humeur en cas de constat par la personne du déclin de ses capacités cognitives.

La diminution des capacités des séniors à traiter les informations et à s'adapter à ces dernières n'a pas que des conséquences cognitives. Effectivement, la dégradation des fonctions exécutives, du temps de réaction, et de la vitesse de traitement de l'information représentent autant de facteurs de risques de chutes chez les séniors (43). Or nous savons depuis longtemps que la chute, la fragilité, et l'autonomie dans les activités quotidiennes sont liées et s'entremêlent en causes et conséquences chez les séniors (44).

La qualité de vie est définie selon de nombreux critères différents, dépendant de nombreuses variables qui peuvent être intriquées entre elles. Ainsi, les atteintes cognitives, les risques de chutes, de perte d'autonomie et de participation, tout comme le niveau d'anxiété et de dépression que nous observons avec le vieillissement ont logiquement un impact sur la qualité de vie des personnes âgées (45). Dans cette étude, l'analyse par tranche d'âge des scores au questionnaire de qualité de vie de l'OMS indiquait bien une baisse de la qualité de vie ressentie auto-rapportée via les questionnaires avec le vieillissement.

Nous résumons la physiologie du vieillissement cognitif ainsi que ses conséquences fonctionnelles en figure 1.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

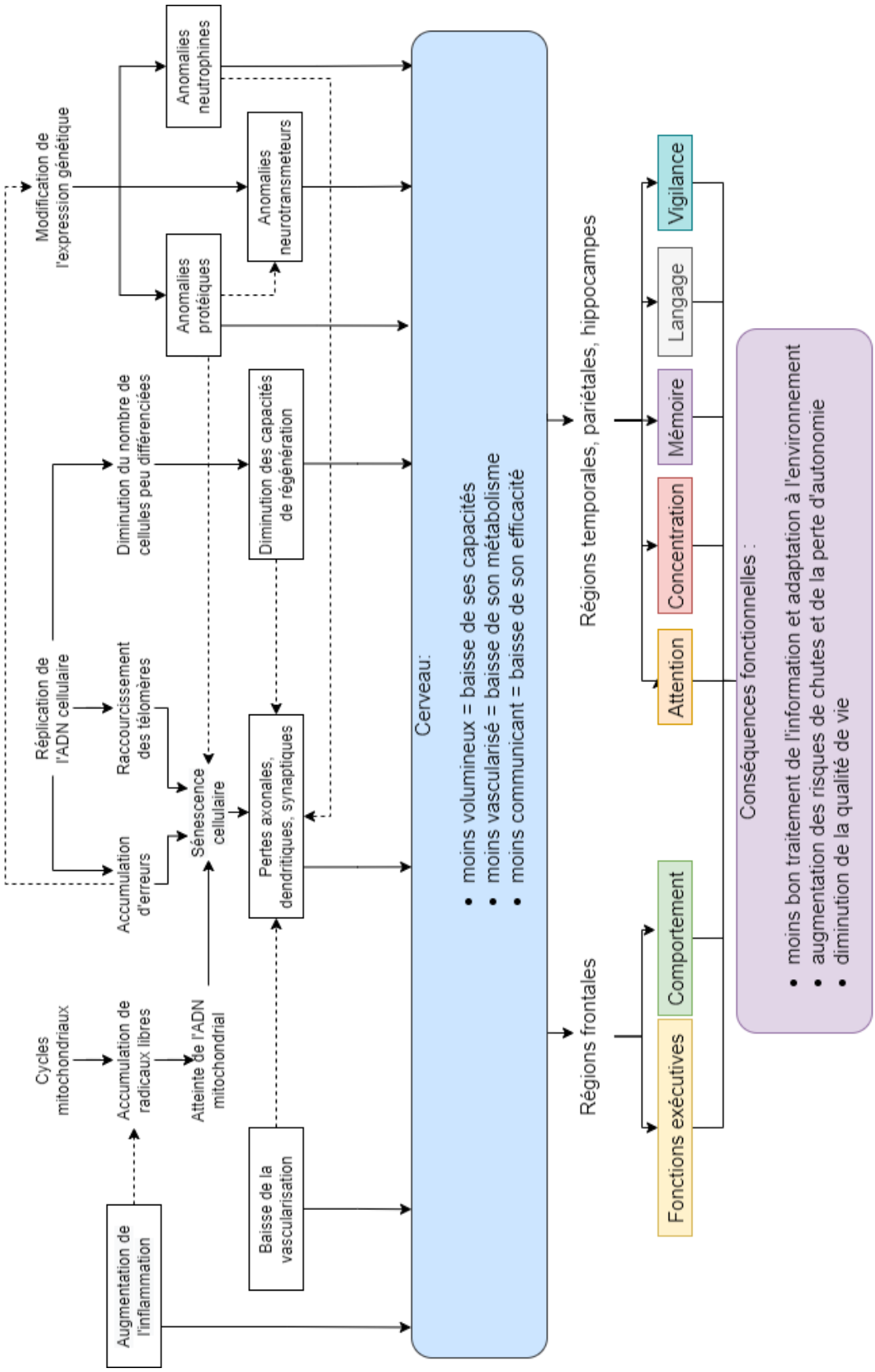


Figure 1 : Physiologie du vieillissement cognitif et conséquences fonctionnelles – inspirée et complétée depuis une publication (46)

Les flèches pleines correspondent à un lien direct, les pointillés à un lien indirect.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

1.3. Vieillissement moteur

Le terme « moteur » renvoie à la notion de déplacement, de mouvement et de mobilité, impliquant la locomotion et le contrôle postural. Les organes impliqués sont nombreux : muscles, tendons, os, cartilages, ligaments, systèmes nerveux centraux et périphériques, etc. Nous nous concentrerons ici sur le complexe muscle-tendon ainsi que les différents capteurs du contrôle postural.

1.3.1. Physiologie du vieillissement moteur

L'avancée en âge s'accompagne de changements structurels au niveau du complexe muscle-tendon avec une diminution du matériel contractile (nombre et taille des fibres musculaires) en parallèle d'une augmentation du matériel non contractile (collagène et tissus adipeux) (47).

Les causes de la perte de matériel contractile, aussi appelée amyotrophie, sont multiples. Tout d'abord, nous observons une baisse de la synthèse protéique musculaire (48,49). Dans le même temps, nous observons une augmentation de l'activité protéasique musculaire (50). La diminution anabolique concomitante à l'augmentation catabolique entraîne une chute majorée du métabolisme musculaire. Ceci est accentué par une baisse de la quantité de cellules myosatellites avec l'âge (51), et donc une baisse des capacités de régénération musculaire. L'amyotrophie musculaire liée à l'âge, appelée sarcopénie, est donc majoritairement due à un déséquilibre du renouvellement protéique.

Le muscle vieillissant est également le siège de modifications structurelles. L'amyotrophie entraîne une diminution de la section (surface en coupe) ainsi que du volume musculaire, dues à une perte en nombre et en taille des fibres musculaires (52). Nous observons de surcroit une diminution de la longueur ainsi que de l'angle de pennation des sarcomères (50). Ceci témoigne d'une diminution en série et en parallèle, respectivement.

Enfin, le muscle vieillissant présente des modifications au regard de son excitabilité. Nous observons ainsi une baisse du couple excitation-contraction (53) ainsi que du nombre d'unités motrices, responsables du recrutement musculaire (54).

Concernant le tendon, le vieillissement entraîne une baisse de l'élasticité et une augmentation de la raideur tendineuse (55). Ainsi, la résistance opposée au muscle lors de sa contraction est majorée, et la transmission des forces est moins rapide ; ceci représente donc une perte d'efficacité dans la production de force. Cette augmentation de la raideur peut aller jusqu'à des limitations d'amplitudes articulaires et donc de mouvement.

L'avancée en âge s'accompagne également de modifications du contrôle postural. Le contrôle postural est une dynamique antigravitaire de la posture du corps pour éviter la chute (56). Le maintien de l'équilibre en position debout demande le traitement et l'intégration des informations sensorielles provenant des systèmes vestibulaire, visuel et somatosensoriel. Nous allons ici nous intéresser particulièrement au système somatosensoriel qui permet la proprioception en évaluant en continu l'état du corps dans l'espace, permettant l'adaptation (57). Le système somatosensoriel englobe de nombreux mécanorécepteurs qui subissent des modifications avec l'âge. Ainsi, les récepteurs superficiels cutanés (corpuscules de Pacini et Ruffini) déclinent en nombre et en densité (58). Dans le même temps, les récepteurs profonds

Licence CC BY-NC-ND 3.0

musculaires (fuseaux neuromusculaires) et tendineux (organes tendineux de Golgi) deviennent plus épais, et diminuent en taille, en nombre et en sensibilité (59).

Cette dégradation du système somatosensoriel impacte le contrôle moteur des séniors d'une manière plus globale, affectant également leur coordination motrice (60).

1.3.2. Conséquences du vieillissement moteur

Voyons dans un premier temps les conséquences directes du vieillissement moteur. Les modifications structurelles et physiologiques du complexe muscle-tendon seraient à l'origine de dégradations fonctionnelles observées chez les séniors (52) : perte globale de capacité de production de force, ainsi que raideur et perte de mobilité. La diminution de la force musculaire ainsi que de la mobilité représentent des facteurs de risques de chutes pour les séniors (61). En parallèle, l'altération de la proprioception entraîne une dégradation dans le ressenti de la position et du mouvement des différents segments corporels, et donc du contrôle postural (59). La dégradation de concert du système somatosensoriel, du contrôle postural, de la coordination motrice et de la qualité musculaire entraîne une dégradation globale de la qualité de la marche (62). Ces dégradations du contrôle postural et de la marche sont autant de facteurs de risque de chute supplémentaires pour les séniors (61). La diminution de la force musculaire, de l'équilibre et de la mobilité générale entraîne une gêne dans les activités de la vie quotidienne, un risque de chute, et donc une limitation dans les participations sociales, voire une invalidité et une perte d'autonomie (63).

D'un point de vue fonctionnel, toutes ces altérations engendrent un double cercle vicieux : les personnes âgées sont moins fortes, mobiles et stables, et pratiquent donc moins d'activité physique tout en étant plus sédentaires (64). Mais ce sont également les séniors les moins forts, mobiles et stables qui ont le plus peur de tomber (65). Or cette peur de tomber entraîne une restriction d'activité (66), alors même que l'activité physique est la clef pour combattre ces déficits. Une revue systématique regroupant 42 études s'est intéressée au lien entre activité physique et qualité de vie chez les séniors (67). Les auteurs constatent que de nombreux sous-domaines de la qualité de vie sont positivement impactés par la pratique d'activité physique : capacités fonctionnelles, autonomie, activités quotidiennes, santé mentale, physique et psychologique. Une seconde étude renforce ces résultats, indiquant qu'un plus haut niveau d'activité physique permet plus d'interactions sociales (68), reconnues comme efficaces contre la dépression chez les séniors (69). Ainsi, les déficits moteurs, la crainte de tomber, les restrictions d'activités et d'interactions sociales ont un impact direct sur la qualité de vie des personnes âgées (70). Les stratégies cherchant à renforcer le niveau d'activité physique des séniors sont donc pertinentes dans une volonté de « bien vieillir ».

Nous résumons la physiologie du vieillissement moteur ainsi que ses conséquences fonctionnelles en figure 2.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

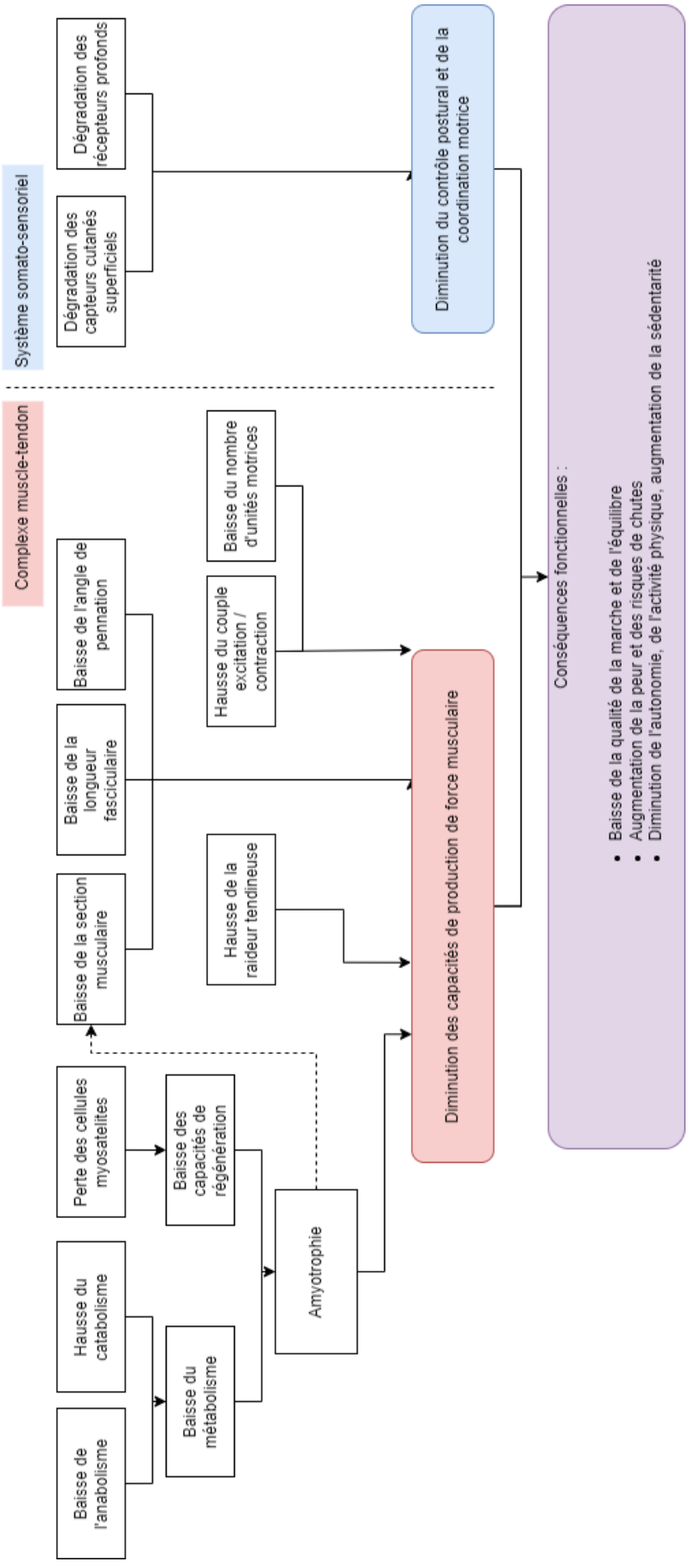


Figure 2 : Physiopathologie et conséquences fonctionnelles du vieillissement moteur

Licence CC BY-NC-ND 3.0

1.4. Vieillissement et doubles tâches (DT)

Le vieillissement entraîne une dégradation des fonctions cognitives et motrices. Il a été constaté que ces déclins cognitifs et moteurs étaient associés et liés entre eux (71). De plus, la plupart des activités quotidiennes exigent la capacité de réaliser deux tâches simultanément, l'une cognitive et l'autre motrice (72). Ces situations peuvent sembler simples : nous sommes capables de marcher en maintenant une conversation ou de maintenir notre équilibre en attendant que le feu passe au vert. Mais nous sommes également capables de situations plus complexes, comme le serveur d'un café déambulant entre les tables en évitant les obstacles tout en maintenant son plateau droit, sans oublier les commandes de ses clients. Ainsi, l'étude de situation de doubles tâches, particulièrement fonctionnelle, a rapidement été développée à partir de ces observations.

1.4.1. Paradigme de DT

Avant toute chose, il est important de préciser que nous parlerons ici systématiquement de doubles tâches cognitivo-motrices, c'est-à-dire une tâche cognitive et une tâche motrice réalisées simultanément. Il existe également des doubles tâches cognitivo-motrices séquentielles selon certains auteurs (73–76), ainsi que des doubles tâches motrices-motrices, que nous n'aborderons pas. Pour simplifier la lecture, l'acronyme DT renverra systématiquement à « doubles tâches cognitivo-motrice simultanées ».

Les situations de DT sont omniprésentes dans notre vie quotidienne : marcher en parlant, se remémorer sa liste de course en parcourant les rayons, etc. Elles sont tout à fait naturelles, si ce n'est faciles, grâce au caractère autonome de la tâche physique : nous n'avons pas besoin de nous concentrer sur notre marche ou sur notre équilibre au quotidien, ce qui nous permet de placer notre attention sur une autre tâche.

Introduit par Abernethy en 1988 (77) puis observé par de nombreux auteurs, le paradigme[2] de DT a été mis en évidence en premier lieu par l'étude du caractère autonome de la marche (79). Un lien a été constaté entre cognition et marche (71,80), ainsi qu'entre cognition et équilibre (81). La marche et le contrôle postural ne nécessitent que peu de ressources attentionnelles en conditions normales. Ainsi, en conditions normales toujours, les ressources attentionnelles peuvent être allouées à une autre tâche réalisée parallèlement (ici cognitive). Toutefois, la réalisation de cette seconde tâche peut s'avérer difficile, voire impossible, aboutissant potentiellement à la dégradation des performances de la tâche cognitive, de la tâche motrice, voire des deux. Ainsi, dans leur revue de 2013 (82), Boisgontier et al. nous indiquent que les âgés sont capables de maintenir un aussi bon contrôle postural que des sujets sains en situation de DT si celle-ci est simple. Toutefois, si les conditions d'équilibre deviennent « dynamiques », à savoir une surface au sol non plane ou une ambiance visuelle alentour, donc plus difficile, nous observons une dégradation des performances de contrôle postural, de la tâche cognitive surnuméraire, ou des deux. Ces résultats suggèrent une

[2] Selon Willet, un paradigme est une représentation concrète d'observations, un modèle de pensée, tandis qu'une théorie est une manière de concevoir, de percevoir et d'expliquer les faits, et qu'un modèle est une manière de représenter ces faits (78). Ainsi, le modèle est une représentation d'une théorie ; la théorie est un ensemble de principes conçus pour expliquer un ensemble de faits ; et le paradigme est une combinaison de normes, théories, postulats et observations constituant une manière de voir la réalité.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

augmentation liée à l'âge du recrutement de ressources attentionnelles lors de la posture en position debout, indiquant un traitement cognitif du contrôle postural plus important chez les séniors.

Une corrélation a été observée entre la baisse des fonctions exécutives (l'attention principalement) et les capacités de contrôle postural et de marche (80,83) avec pour conséquence une baisse des performances en situation de DT comparées à une situation de simple tâche (ST), c'est-à-dire la réalisation de la tâche cognitive et de la tâche motrice indépendamment l'une de l'autre. Cette baisse de performances en DT par rapport à de la ST a alors été nommée « coût de la DT » (84). Le calcul du coût de la DT est le suivant :

$$\text{coût de DT} = \frac{(\text{ST - DT})}{\text{ST}} \times 100$$

avec DT : performance en doubles tâches ; et ST : performance en simple tâche.

1.4.2. Concept d'interférence cognitivo-motrice (ICM)

Il est nécessaire de définir l'interférence cognitivo-motrice (ICM), intrinsèquement liée au paradigme de DT. Le concept d'ICM est un modèle explicatif de la dégradation des performances de l'une, l'autre ou les deux tâches lorsqu'elles sont réalisées simultanément. Différents modèles ont été proposés pour expliquer et décrire l'ICM depuis sa première description en 1994 (85).

Selon le modèle de concurrence entre les domaines (ou *cross-domain competition model*), les contrôles de la tâche motrice et de la tâche cognitive rivalisent en ressources attentionnelles (86,87). Ainsi, l'apparition d'ICM dépendrait du capital en ressources attentionnelles de la personne, qui peuvent être représentées par des volumes (figure 3).

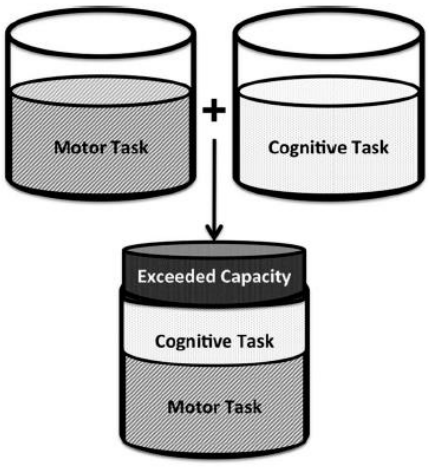


Figure 3 : Illustration de la théorie de concurrence entre les domaines expliquant l'ICM (88)

Selon ce modèle, l'addition des volumes attentionnels que représentent la tâche motrice et la tâche cognitive peut mener à un dépassement des capacités totales.

Le modèle du goulot d'étranglement (ou *bottleneck theory*) suggère que deux tâches concurrentes partageant les mêmes processus attentionnels ne peuvent être toutes les deux

Licence CC BY-NC-ND 3.0

réalisées simultanément, aboutissant à une dégradation des performances en DT (89). Ceci peut être visualisé comme une régulation de l'attention, avec un passage rapide d'une tâche à une autre, pouvant être représenté dans le temps (figure 4). Ainsi, l'apparition d'ICM dépendrait des capacités de coordination de tâches (90) via l'efficacité du partage attentionnel (91,92) de la personne.

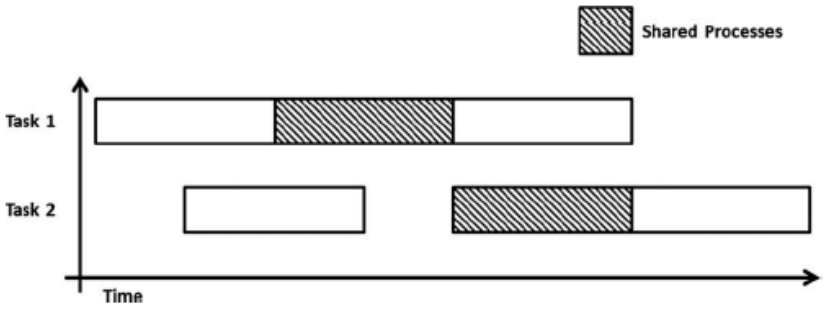


Figure 4 : Illustration de la théorie du goulot d'étranglement expliquant l'ICM (88)

Selon ce modèle, le passage d'une tâche à une autre nécessitant les mêmes ressources attentionnelles peut engendrer un chevauchement de demande.

Enfin, le modèle de priorisation de la tâche (ou *task priorization model*) propose une prise en compte de stratégies adaptatives propres à l'individu (93) (figure 5). C'est par exemple la priorisation de la marche ou de l'équilibre plutôt que la parole afin d'éviter une chute (94). Ainsi, l'apparition d'ICM dépendrait du degré d'automatisation des tâches prioritaires motrices et de leur coût attentionnel.

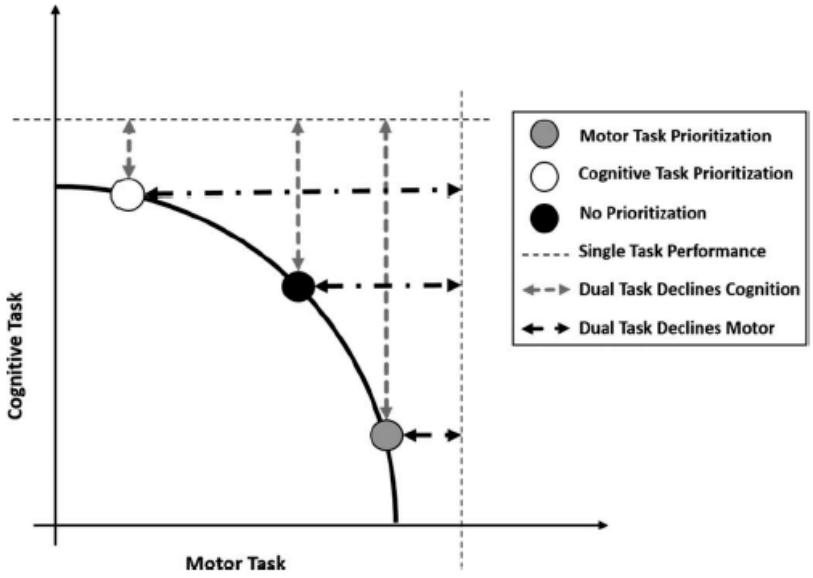


Figure 5 : Illustration de la théorie de la priorisation de la tâche expliquant l'ICM (88)

Selon ce modèle, la tâche dégradée, voire shuntée, dépendra de la stratégie adoptée par l'individu, dépendant de son profil.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Il est important de noter que dans ces modèles théoriques, les relations entre les deux tâches ne sont pas uniquement délétères. Plummer et al. ont synthétisé (95) puis illustré (96) ces différents scénarios dans le cadre de l'accident vasculaire cérébral. Ainsi, il est possible que les situations de DT soient facilitatrices et améliorent les performances cognitives et/ou motrices (figure 6). Une fonction motrice serait par exemple améliorée lors de la réalisation d'une tâche cognitive concurrente à faible niveau attentionnel (97). Le « coût de la DT » devient alors « l'effet de la DT » (ou *dual task effect* DTE) (84), illustrant la conséquence potentiellement bénéfique que n'exprime pas le terme coût.

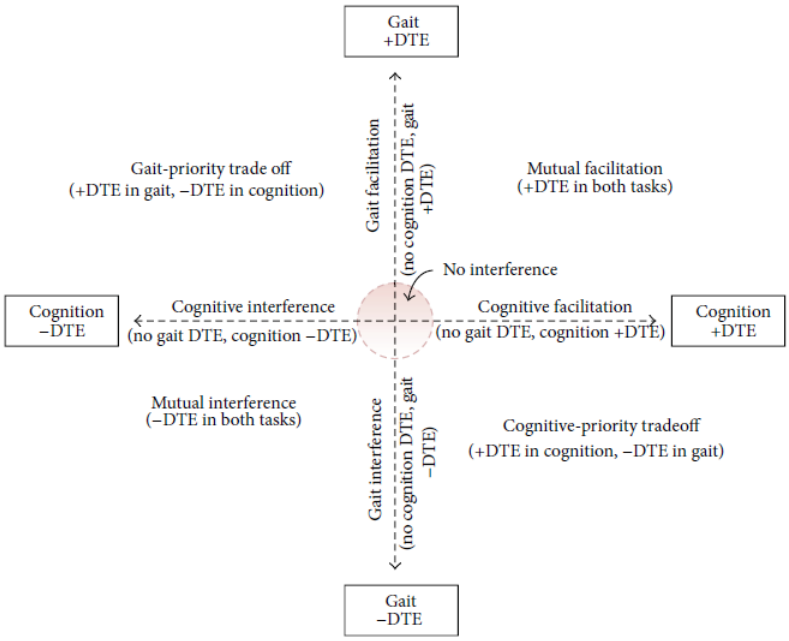


Figure 6 : Différents scénarios possibles des conséquences de l'ICM sur les performances en DT (96)

Dans ce schéma, nous pouvons voir que l'effet de la DT, ou *dual task effect* (DTE) n'est pas nécessairement néfaste. Dans le cadran inférieur gauche, l'effet de la DT est décrit comme négatif tant sur la marche que sur la cognition ; c'est l'interférence mutuelle. À l'inverse, dans le cadran supérieur droit, l'effet de la DT est positif pour les deux fonctions ; c'est la facilitation mutuelle.

Bayot et al. proposent une catégorisation différente des modèles théoriques d'ICM en les réunissant, en les croisant et en définissant des sous-catégories (84) (figure 7). Ainsi, le modèle de priorisation de la tâche devient une sous-catégorie dans les modèles de goulot d'étranglement, et deux nouveaux modèles font leur apparition.

Le modèle de diaphonie (ou *cross-talk model*) est une explication possible pour la facilitation réciproque avancée par Plummer, et aurait lieu lorsque les deux tâches appartiennent à des domaines similaires et utilisent les mêmes populations neuronales, les tâches ne se dérangeant alors pas (98).

Enfin l'hypothèse de partage du temps (ou *time-sharing hypothesis*) est la dernière proposition faite par Nijboer et al. en 2014 (99). Selon cette hypothèse, les tâches doivent partager le temps comme dans le modèle du goulot d'étranglement. Ainsi, les zones cérébrales impliquées dans la réalisation d'une tâche sont moins actives lorsque cette tâche est réalisée

Licence CC BY-NC-ND 3.0

en situation de DT qu'en ST. Les situations d'ICM seraient dues à des étapes de traitement supplémentaires qui ne se trouvent dans aucune des ST séparées ; par exemple, un effort plus important à fournir afin d'éviter des erreurs.

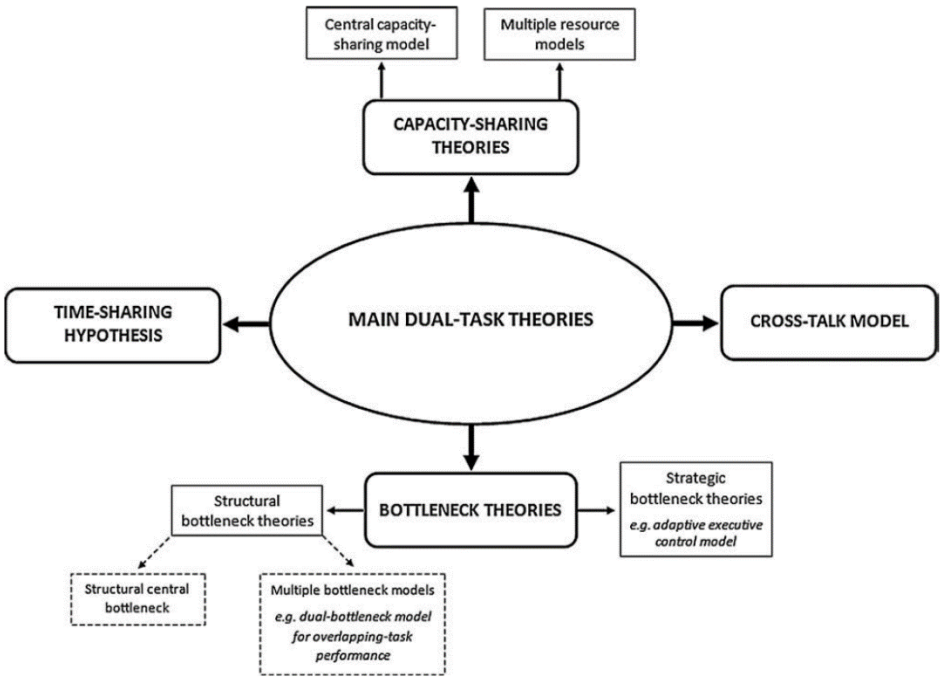


Figure 7 : Modèles théoriques actuels de l'ICM (84)

1.4.3. Différents paramètres en situation de DT et conséquences sur l'ICM

Les situations de DT ne sont pas toutes identiques, et il est important d'en définir les paramètres descriptifs. Tout d'abord, la notion de tâche primaire ou secondaire : la tâche primaire est dite « attentionnelle », c'est celle qui demande de l'attention (par exemple, parler) tandis que la tâche secondaire serait celle « automatisée » (par exemple, marcher) (35). Comme nous l'avons vu, il peut exister plusieurs niveaux de difficulté des tâches primaires ou secondaires, suivant leurs niveaux d'automatisation, de difficulté en termes de ressources attentionnelles sollicitées, ou de nouveauté (100). Le tout peut faire intervenir des tâches de nature différentes (101), et impliquer de nombreux sous-domaines moteurs (marche, équilibre, mobilité plus large ou complexe) ou cognitifs (sémantiques, rythmiques, etc.).

La tâche cognitive peut être hétérogénérée si elle est non contrôlée par la personne (ex : réception d'un son extérieur) ou autogénérée si elle est produite par la personne (ex : parler) (77). Selon la méta-analyse de 2011 réalisée par Al-Yahya et al. regroupant 66 études, les ICM dues à des tâches cognitives autogénérées semblent perturber davantage les performances de marches que celles induites par des tâches cognitives hétérogénérées (102). Selon les auteurs, ceci s'expliquerait par le recrutement de circuits neuronaux de plus haut niveau lors de la réalisation de tâches cognitives autogénérées, perturbant davantage la tâche secondaire.

La notion de tâche prioritaire peut être définie comme la tâche que l'on priorise volontairement ou non, c'est-à-dire celle qui persiste en cas d'ICM. C'est l'exemple du *stop talking when walking*, pouvant illustrer la stratégie de préservation mise en place par les séniors (103). La

Licence CC BY-NC-ND 3.0

priorisation de la tâche dépendra donc de la stratégie adoptée, mais également de son niveau de difficulté (100).

La modalité de combinaison des deux tâches en situation de DT peut également varier. Ainsi, selon la taxonomie proposée par Herold et al. en 2018 (104), les deux tâches peuvent être additionnées ou bien incorporées. Ainsi, la tâche cognitive peut être simplement ajoutée à la tâche motrice, correspondant à la notion de *« thinking while moving »*. Dans ce cas, la réalisation de l'une des tâches ne nécessite pas la réalisation de l'autre – l'exemple donné par les auteurs est la complétion d'une tâche arithmétique en pédalant sur ergocycle. À l'inverse, la tâche cognitive peut être incorporée à la tâche motrice, correspondant à la notion de *« moving while thinikg »*. Dans ce scénario, effectuer l'une des deux tâches nécessite de réaliser la seconde simultanément. L'exemple donné par les auteurs est de restituer une séquence de navigation en marchant, nécessitant à la fois de marcher et de faire appel à sa mémoire de travail visuospatiale.

Les schémas d'ICM ne sont ni fixes ni constants et dépendent de nombreux facteurs comme les caractéristiques individuelles (notamment ses capacités cognitives et motrices) (95), la nature (82,101), la difficulté ainsi que de la nouveauté (100) des tâches primaires et secondaires, ainsi que les instructions concernant la tâche à prioriser (82,95). Tout ceci est exposé dans la proposition de taxonomie et de modèles explicatifs de McIsaac et al. de 2015 (100), dans lesquels la notion de difficulté regroupe de nombreux facteurs (figure 8). Toutefois, il n'est pas clair qu'une diminution de l'ICM soit signe d'une amélioration des capacités de DT (96).

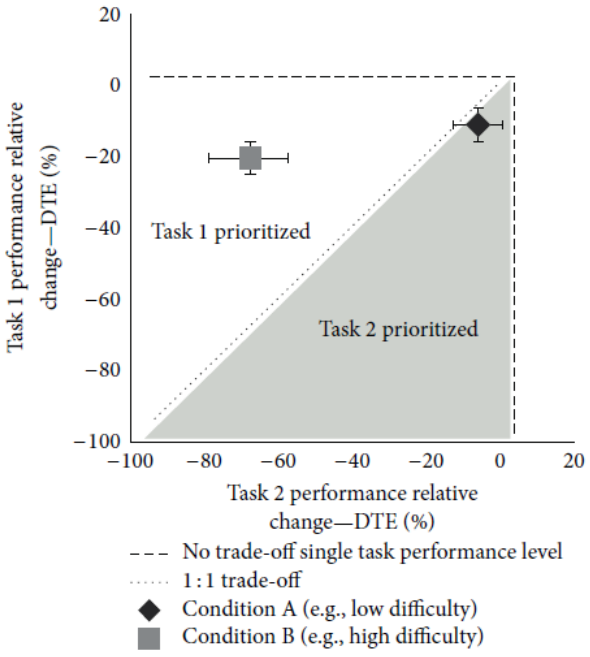


Figure 8 : Variations de difficulté des DT et conséquences sur les performances (100)

Ainsi, la réalisation d'une tâche cognitive et d'une tâche motrice simultanément peut aboutir à la dégradation des performances de l'une ou des deux tâches – c'est l'ICM. Ceci peut s'expliquer par une concurrence en ressources attentionnelles entre les deux tâches avec une

Licence CC BY-NC-ND 3.0

difficulté de coordination et de partage attentionnel de la personne. La fréquence d'apparition et l'incidence fonctionnelle de ces ICM sont dépendantes de nombreux facteurs personnels, dont l'âge.

1.4.4. Conséquences du vieillissement sur les capacités de DT

Le vieillissement entraînant une diminution des capacités cognitives et motrices, il n'est pas étonnant que nous observions une altération des performances en situation de DT (71,92).

Nous l'avons vu, le vieillissement entraîne une diminution des fonctions exécutives, des capacités attentionnelles, de concentration et de la vitesse de traitement des données. Ceci a pour conséquences une diminution des ressources attentionnelles globales ainsi que des capacités de coordination de tâches et de partage attentionnel. De plus, la marche n'est plus une activité purement automatique avec l'âge (79), comme le montrent le paradigme de DT et la dégradation des performances de marche en situation de DT décrite par Beauchet et Mourey dès 2003 (105). Que ce soit par un dépassement des capacités attentionnelles ou une incapacité à partager l'attention, les conséquences sont une augmentation de l'ICM avec l'âge (80).

Une augmentation de l'ICM signifie que celle-ci peut apparaître plus rapidement en situation de DT, empêchant la réalisation de l'une, de l'autre ou des deux tâches correctement. Les conséquences directes pour la personne sont une diminution de l'autonomie et des capacités fonctionnelles, car la plupart des activités quotidiennes exigent la capacité de maintenir l'équilibre ou de marcher tout en exécutant simultanément une autre tâche (72). C'est la situation du *stop talking when walking*, non dangereuse mais potentiellement handicapante. Elle est surtout prédictive de risque de chute à 6 mois, très spécifique mais peu sensible[3] (103). Mais les conséquences peuvent être plus graves lors de la dégradation de la tâche secondaire motrice d'équilibre ou de marche. Dans ce cas, l'augmentation de l'ICM pourrait engendrer un plus fort risque de chute chez les séniors (35). Or l'augmentation des risques de chutes et la peur qui en découle, la réduction des capacités cognitivo-motrices et son impact sur les capacités fonctionnelles et l'autonomie représentent, comme nous l'avons vu précédemment, une réduction globale de la qualité de vie chez les personnes âgées.

[3] Spécificité et sensibilité sont des propriétés permettant de caractériser un test pour un critère donné dans une population précise. La spécificité d'un test est sa capacité à détecter un vrai négatif, tandis que la sensibilité d'un test est sa capacité à détecter un vrai positif.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé de la Partie 1

Le vieillissement est un phénomène biopsychosocial inéluctable et inégal entre les individus, pouvant s'accompagner ou non d'une perte d'indépendance. Le maintien de l'autonomie des personnes et donc de leur qualité de vie reposera entre autres choses sur le maintien de leurs capacités cognitives et motrices.

Le cerveau vieillissant communique moins efficacement (dendrites, neurotransmetteurs), se régénère moins (neurotrophines, vascularisation), et présente des anomalies et des disfonctionnements (accumulations protéiques, inflammation). Ceci a pour conséquence une diminution des capacités cognitives globales, et en particulier les fonctions exécutives, les capacités attentionnelles, la concentration et la vitesse de traitement des données. Ceci a également pour conséquences une augmentation du niveau d'anxiété et de dépression.

En parallèle, le complexe muscle-tendon vieillissant est moins capable de produire de la force (sarcopénie, angle de pennation et longueur des sarcomères) et moins efficace (excitabilité et raideur), tandis que le contrôle postural se dégrade à cause de la baisse des qualités proprioceptives. Ceci entraîne une baisse de la force musculaire, de la mobilité et du contrôle postural. L'impact est global sur le niveau d'activité physique et les capacités fonctionnelles, alors même que le niveau d'activité physique est une des clefs pour combattre ce déclin.

Le vieillissement entraîne également une diminution des capacités des personnes à réaliser deux tâches simultanément, l'une cognitive et l'autre motrice. Ceci peut s'expliquer par le concept d'ICM, avec une diminution partielle ou totale des performances de l'une, l'autre ou des deux tâches lorsqu'elles sont concomitantes. L'augmentation de cette interférence avec l'âge s'explique par une diminution des capacités cognitives et motrices ainsi qu'une perte de l'automatisation des tâches motrices simples.

Ces déficits cognitifs, moteurs et de DT représentent autant de facteurs de risque de chute et de possibles limitations de l'autonomie dans les activités quotidiennes, menant à une réduction de la qualité de vie des séniors.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

2. Effets des entraînements cognitifs et moteurs

Le vieillissement entraîne des diminutions de capacités cognitives, motrices, et à réaliser deux tâches simultanément. Tous ces déclins ont entre autres choses pour conséquence l'augmentation du risque de chute, et pour finir une dégradation de la qualité de vie. Il est toutefois possible de retarder ce déclin en freinant la pente de sénescence. Ceci se fait par le biais d'entraînements, tant cognitifs que moteurs.

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux effets[4] des entraînements cognitifs d'une part, et d'autre part des entraînements moteurs sur les fonctions cognitives et motrices ainsi que sur la qualité de vie, puis nous verrons comment et pourquoi la proposition de les combiner a été pensée.

2.1. Effets des entraînements cognitifs

Un entraînement est défini comme « une préparation régulière et méthodique à un exercice physique ou intellectuel, constituée d'un ensemble d'exercices physiques ou cognitifs variés visant l'acquisition d'un savoir-faire ». Nous aborderons dans un premier temps les entraînements cognitifs, c'est-à-dire des interventions proposant des exercices cognitifs ciblant des fonctions cognitives en particulier.

2.1.1. Effets des entraînements cognitifs sur les fonctions cognitives

Des auteurs ont constaté un lien entre la participation à des activités cognitivement stimulantes telles que lire, jouer à des jeux de plateau ou bien pratiquer un instrument de musique, et un retard du déclin cognitif (106,107).

Ainsi, à partir de ce constat issu d'études observationnelles, il a été proposé des études interventionnelles afin d'évaluer les effets d'entraînements cognitifs sur les fonctions cognitives chez les séniors. La nature des entraînements cognitifs est alors variée. Ils peuvent ne cibler qu'un seul domaine cognitif comme la mémoire (108), la mémoire de travail (109) ou l'attention (110), ou bien être multi domaines (111). De plus, ils peuvent être dispensés à l'oral par un thérapeute (112), mais sont le plus souvent dispensés par ordinateur (113,114). Un exemple d'entraînement cognitif est CogniFit ® (113), une plateforme en ligne commerciale accessible sur tout support, proposant des entraînements de l'attention, la concentration, la compréhension, la coordination, la mémoire, le raisonnement, le tout par le biais de jeux.

Dans une revue systématique avec méta-analyse, Kelly et al. ont synthétisé les résultats de 31 études regroupant 4555 participants âgés sains, consacrées aux effets d'entraînements cognitifs sur les fonctions cognitives (115). Les modalités d'interventions étaient diverses, avec des entraînements en groupe ou individuels, pouvant être oraux, visuels, sur papier ou sur ordinateur. Les durées, fréquences et longueurs d'entraînement étaient elles aussi variées. Globalement, les entraînements cognitifs étaient efficaces pour améliorer la cognition, et plus

[4] Ces effets peuvent être de deux sortes. Dans ce manuscrit, nous parlerons aussi bien des effets chroniques (ou durables) dus à la répétition de l'exercice dans le temps, que des effets aigus ou immédiats de la pratique de l'exercice à un temps donné.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

efficaces que des groupes contrôles actifs[5] pour améliorer la mémoire de travail ainsi que la vitesse de traitement (115). De plus, cette étude a permis de montrer que les bénéfices pouvaient être maintenus jusqu'à 6 mois, et qu'ils pouvaient être transférés à des tâches non entraînées, voire à des tâches fonctionnelles de la vie courante. Le transfert des bénéfices est défini comme l'observation d'un progrès pour une fonction qui n'était pas directement entraînée.

Cette notion de transfert peut s'expliquer selon les modalités d'entraînement. Effectivement, l'approche sélective qui consiste à reproduire une tâche d'entraînement donnée de manière répétée (116) permet de viser un processus cognitif spécifique, mais le risque est que la tâche soit redondante, potentiellement ennuyeuse, et pas directement écologique[6]. À l'inverse, l'approche multi-domaines consiste en un travail d'un ensemble de tâches cognitives qui vise à améliorer les différentes fonctions ciblées, mais aussi à transposer ces gains de façon fonctionnelle (117).

2.1.2. Effets des entraînements cognitifs sur les fonctions motrices

De nombreux auteurs ont décrit un lien existant entre cognition et motricité (102), par exemple entre contrôle exécutif et équilibre postural ou marche (80,118,119), ou bien entre déclin cognitif et chutes (120).

De ces études observationnelles est apparue une nouvelle approche interventionnelle : investiguer les bienfaits d'entraînements cognitifs sur des domaines moteurs non entraînés. La revue systématique de la littérature de Pichierri et al. montre par exemple que des entraînements cognitifs avec ou sans entraînement moteur en parallèle peuvent induire des bénéfices moteurs chez des sujets âgés sains ou atteints de pathologies neurologiques (121). Fort de ce constat, des études expérimentales ont été menées avec des entraînements strictement cognitifs chez des séniors sains. Les entraînements cognitifs étaient constitués d'exercices d'inhibition mentale, de temps de réaction et de vitesse de traitement dispensés par le biais d'ordinateurs (122) pouvant prendre la forme de jeux (123,124). Les résultats sont les suivants : les entraînements cognitifs semblent induire des bénéfices sur le contrôle postural (124,125), sur l'allure de marche (123,124) ainsi que sur la mobilité (124) chez des séniors sains.

Dans une revue systématique avec méta-analyse, Marusic et al. ont synthétisé les résultats de 10 essais contrôlés randomisés regroupant au total 351 participants portant sur les effets d'entraînements cognitifs sur la marche chez des séniors (126). Les entraînements étaient majoritairement informatisés et supervisés, avec des durées, longueurs et fréquences variées. Globalement, les entraînements cognitifs permettent d'améliorer des fonctions de mobilité complexe faisant intervenir la cognition, et non la marche simple (126). Ceci s'expliquerait soit par l'utilisation de fonctions cognitives supérieures comme les fonctions exécutives et l'attention lors de la marche (80,118,127,128), soit par une notion de transfert dû à une forme de neuroplasticité entre des zones cérébrales ou des réseaux neuronaux communs sollicités

[5] Un groupe contrôle est dit « actif » si une activité additionnelle à celles réalisées habituellement par les participants leur est proposée. À l'inverse, un groupe contrôle dans lequel les participants poursuivent leurs activités quotidiennes habituelles sans ajout ou retrait est dit « inactif ».

[6] Une mise en situation écologique est une situation réelle, c'est-à-dire une activité réelle réalisée dans les conditions de vie réelles.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

aussi bien lors d'activités cognitives que lors de la marche (129,130). Il est intéressant de noter que selon cette méta-analyse, la durée, la fréquence ainsi que la longueur des interventions n'avaient pas d'impact sur leur efficacité à court terme.

Les effets des entraînements cognitifs sur le plan moteur présentent un grand intérêt dans le cas de personnes ne pouvant pas ou ne souhaitant pas réaliser d'entraînement moteur. Toutefois, ils ne représentent pas le traitement de référence (ou *gold standard*).

2.1.3. Effets des entraînements cognitifs sur des déterminants de la qualité de vie

Nous avons abordé précédemment l'existence d'un lien entre capacités motrices et cognitives, risques et peur de tomber, restrictions d'activités et qualité de vie des personnes âgées (70). Ainsi, et au vu de leurs effets, il n'est pas surprenant que des programmes d'entraînement cognitif permettent une amélioration de la qualité de vie chez des séniors (131). Dans cette étude, 2802 participants de plus de 65 ans ont été répartis en trois groupes d'entraînement cognitif : mémoire, raisonnement, et vitesse de traitement (131). Les résultats sont une amélioration des fonctions cognitives pour tous les groupes, et une amélioration de la qualité de vie évaluée par le questionnaire SF36 (*short form health survey*) pour le groupe vitesse de traitement. Ceci peut s'expliquer tant par l'amélioration des capacités à réaliser ces activités quotidiennes et par le maintien de l'autonomie permis par les entraînements cognitifs comme suggéré dans une méta-analyse (115) que par leurs effets dans la lutte contre la dépression et pour le maintien d'une bonne santé mentale (132).

2.1.4. Adhérence aux entraînements cognitifs

Bien que la nature et le coefficient de la relation effet-dose ne soient pas encore tout à fait établis, il semble que l'efficacité d'un entraînement cognitif dépende du respect de son contenu, tant quantitatif que qualitatif (133). Il est compliqué de définir une valeur de référence pour une bonne ou une mauvaise adhérence[7] (136). La valeur standard de 80% est largement remise en question ; une récente analyse sur ce sujet nous indique qu'un niveau satisfaisant d'adhérence à une intervention doit dépendre de la population, de l'intervention et du critère de jugement de l'étude (136).

Dans leur revue systématique de 2012, Kueider et al. abordaient déjà le défi que peut représenter l'adhérence aux programmes d'entraînements cognitifs, assez faible pour leur version traditionnelle « papier-stylo » (137). Selon ces mêmes auteurs, les entraînements cognitifs informatisés permettraient un meilleur engagement, mais surtout un meilleur maintien dans le programme des personnes âgées, car ils sont conçus pour être amusants et excitants. Dans ce sens, Turunen et al. se sont intéressés aux paramètres déterminants de l'adhérence des séniors aux programmes d'entraînements cognitifs informatisés (133). Leurs résultats chez 631 personnes âgées démentes ou pré-démentes montrent que des paramètres psychosociaux tels que de meilleures performances de mémoire, une expérience passée en

[7] La notion d'adhérence est elle-même délicate à définir selon Aronson (134). Sur la base de leurs travaux et des différentes définitions que nous pouvons rencontrer, nous avons choisi de regrouper sous le terme « adhérence » à la fois l'engagement (ou adhésion), le respect du contenu (compliance), qui peut être qualitatif ou quantitatif (présence ou réalisation) (135), ainsi que la réalisation jusqu'au terme (ou complétion).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

informatique, mais aussi une attente positive vis-à-vis de l'expérience sont les facteurs prépondérants d'une bonne adhérence à un entraînement cognitif informatisé.

Ainsi, une personne âgée qui maintient ses capacités cognitives est plus à même de conserver ses fonctions cognitives, mais aussi motrices, de rester autonome et de s'adapter à son environnement. Elle présente également moins de risque de développer des symptômes anxieux ou dépressifs, ce qui maintient son niveau de qualité de vie. En ce sens, les entraînements cognitifs semblent positifs chez les séniors. Pour ce faire, ils doivent être respectés, les participants devant réaliser le nombre de séances prescrites, en respecter le contenu, et aller jusqu'au terme du programme d'entraînement pour que celui-ci soit le plus efficace possible. Pour ce faire, la mise en œuvre d'un entraînement cognitif informatisé et la bonne explication des bénéfices attendus suite à cet entraînement semblent pertinentes.

Il est intéressant de noter que dans la majorité des études citées, les entraînements cognitifs étaient proposés selon des modalités proches, avec une durée d'exercice relativement basse (comprise entre 15 et 20 minutes), mais une fréquence d'exercice élevée, supérieure à 3 fois par semaine, souvent proche de 5. La longueur de l'intervention était très variable, allant d'une semaine à plusieurs mois.

2.2. Effets des entraînements moteurs

Les entraînements moteurs sont des interventions constituées d'exercices moteurs répétés dans le but de progresser[8]. Ils induisent donc de l'activité physique, définie par l'OMS comme « tout mouvement corporel produit par les muscles qui requiert une dépense d'énergie ». Ce sont eux qui sont considérés comme *gold standard* pour l'amélioration des capacités motrices.

2.2.1. Effets des entraînements moteurs sur les fonctions motrices

La pratique régulière d'une activité physique présente des bénéfices pour chacun et à tout âge, en améliorant les capacités fonctionnelles et en améliorant la qualité de vie (138,139). Concernant les séniors, l'*American College of Sports Medicine* recommande d'entraîner spécifiquement les capacités aérobies, la flexibilité, la mobilité, l'équilibre et la force afin de diminuer les risques de chutes (140).

Sachant les bienfaits de l'activité physique ainsi que les recommandations de pratique concernant les séniors, de nombreux auteurs ont proposé des interventions comprenant des programmes d'entraînements moteurs afin d'en étudier les effets sur des fonctions motrices cibles. De nombreuses revues systématiques ont synthétisé ces travaux. Ainsi, les entraînements aérobies apporteraient des bénéfices sur les capacités cardiovasculaires, métaboliques, mais également fonctionnelles et sur la qualité de vie chez des séniors (141). Les entraînements d'équilibre (142) et de mobilité (143) seraient efficaces sur l'équilibre (142,143), le contrôle postural (142,143) et le temps de réaction (143). Enfin, les

[8] Nous rassemblons volontairement ici les entraînements physiques (entraînements en endurance et en résistance) et les entraînements moteurs ou locomoteurs (équilibre postural, coordination motrice, mobilité et motricité) pour plus de clarté dans la lecture.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

entraînements en résistance entraîneraient une augmentation de la force, de la masse musculaire, de la puissance ainsi que des capacités fonctionnelles, et une réduction des risques de chutes chez des séniors (144).

Deux récentes études se sont intéressées aux effets de tous ces types d'entraînements, cette fois non pris séparément (145,146). Nous parlons alors d'entraînements multimodaux, qui consistent en la combinaison d'entraînements aérobie, d'endurance ou de force musculaire, d'équilibre et de stabilité, de flexibilité ou de coordination. Ces deux revues systématiques de la littérature nous apprennent que les entraînements multimodaux sont efficaces pour améliorer les capacités cardiorespiratoires et métaboliques, les capacités fonctionnelles incluant la force, l'équilibre et la marche, ainsi que la qualité de vie chez des séniors (145,146).

Les programmes d'entraînement de prévention de chute sont une forme particulière d'entraînements moteurs qui ciblent une réduction des facteurs de risques et des chutes chez les personnes âgées (147). Ces programmes permettraient également une réduction de la peur de tomber (148), quelle que soit l'activité physique pratiquée : programmes d'entraînement multimodaux, tai-chi, etc. Cette peur de tomber étant un paramètre prépondérant dans la restriction d'activité et la perte de qualité de vie chez les personnes âgées (149), sa réduction semble particulièrement pertinente.

Il semble clair que les entraînements moteurs entraînent des bénéfices sur de nombreuses capacités motrices et fonctionnelles chez les séniors. Il est donc pertinent d'encourager l'activité physique, fortement bénéfique pour les séniors, qu'elle soit cadrée au sein de programmes d'entraînements, ou libre même réalisée à petites doses[9] (150). En ce sens, des programmes d'encouragement à l'activité physique ont été créés et ont montré leur efficacité, comme le programme CHAMPS (151), proposé dans une version révisée quelques années plus tard nommée CHAMPS 2 (152). Le programme CHAMPS 2 consistait en 6 mois d'encouragement à la pratique d'activité physique pour des séniors sédentaires et inactifs. Ce programme était personnalisé aux goûts et modes de vie des séniors, et de difficulté incrémentale allant jusqu'à 30 minutes d'activité physique d'intensité modérée chaque jour à la fin du programme. Les bénéfices étaient alors nombreux, notamment sur des paramètres relatifs au bien-être psychologique et à la qualité de vie (151,152). Ainsi, comme pour les entraînements cognitifs, les bénéfices des entraînements moteurs ne sont pas propres à la fonction ciblée, faisant appel à la notion de transfert.

2.2.2. Effets des entraînements moteurs sur les fonctions cognitives

Des auteurs ont constaté un lien positif entre le niveau de pratique d'activité physique et le niveau de fonctions exécutives chez les séniors (153–155).

De ces observations ne permettant pas d'établir un lien de causalité direct, de nombreux auteurs ont proposé une approche interventionnelle. Ces travaux ont été synthétisés dans de nombreuses revues de littérature, qu'elles soient narratives ou systématiques avec ou sans méta-analyse (141,145,156–158). Toutes ces revues vont dans le même sens : les

[9] La notion de dose en entraînement renvoie à la dosologie, soit les caractéristiques qualitatives et quantitatives de l'entraînement : ce qui est fait, à quelle fréquence, pendant quelle durée. C'est un synonyme de la posologie médicamenteuse.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

entraînements aérobies (141,156–158), en force (158), mais également multimodaux (145) permettent une amélioration de la cognition chez les séniors. Ceci s'observe plus ou moins fortement suivant les études précédemment citées sur les fonctions exécutives, l'attention, la mémoire ainsi que la vitesse de traitement.

Ces bénéfices s'expliqueraient par de nombreux facteurs directs ou indirects[10] (158). Tout d'abord par des facteurs dits de santé : l'activité physique permet une amélioration du sommeil, une réduction du stress, ainsi qu'une amélioration des fonctions cardiaques, qui impactent les capacités neurocognitives. Puis interviennent des facteurs physiologiques : au niveau neurobiologique, l'activité physique entraîne une augmentation de l'angiogenèse, de la neurogénèse et de la synapsogenèse par l'augmentation de l'oxygénation cérébrale, ainsi qu'une augmentation des taux de BDNF et IGF-1. Enfin, comme dans le cas des effets des entraînements cognitifs entraînant des bénéfices sur le plan moteur, ces bénéfices des entraînements moteurs sur les fonctions cognitives pourraient s'expliquer par l'utilisation commune de réseaux neuronaux lors de ces activités physiques et cognitives (129,130).

2.2.3. Effets des entraînements moteurs sur des déterminants de la qualité de vie

Le raisonnement qui s'applique aux entraînements cognitifs s'applique de même ici : puisqu'il existe un lien entre capacités motrices et cognitives, risques et peur de tomber, restrictions d'activités et qualité de vie des personnes âgées, il n'est pas anormal que les entraînements moteurs permettent le maintien de la qualité de vie. Des travaux allant en ce sens apparaissent dès 1991 (159), avec une proposition de cadre conceptuel de qualité de vie multimodale comme celui de la définition par l'OMS. Cette première synthèse nous indique déjà que les entraînements moteurs permettent l'amélioration de certains paramètres de la qualité de vie des séniors. Sans surprise, différents travaux se sont accordés depuis sur l'impact positif de la pratique d'une activité physique sur la qualité de vie (160,161). Tout ceci a fait l'objet d'une synthèse dans la revue de littérature de Rejeski et Mihalko de 2001 (162). Ces bénéfices peuvent s'expliquer par les bienfaits connus de la pratique d'une activité physique et des entraînements moteurs dans le maintien des fonctions locomotrices et cognitives, et donc de la mobilité et de l'autonomie, mais aussi par des effets sur la santé mentale. En 1999 déjà, Blumenthal et al. proposaient un programme d'entraînement aérobie de 16 semaines à 156 sujets âgés présentant un trouble dépressif majeur, en comparaison à une prise d'antidépresseurs (163). Les résultats sont clairs : bien que la réduction des symptômes dépressifs soit plus rapide lors de la consommation d'antidépresseurs, les bénéfices à long terme sont équivalents entre la pratique d'une activité physique et la prise médicamenteuse. D'autres études ont été menées par la suite, dont les résultats positifs similaires sont synthétisés dans deux revues de la littérature, l'une de 2005 (164) et l'autre de 2015 (165).

2.2.4. Adhérence aux entraînements moteurs

Le bon respect d'un programme d'entraînement physique semble être la clef pour en obtenir les bénéfices (166). Bien que la définition d'une bonne adhérence soit toujours délicate (136),

[10] Si l'on prend l'exemple de la neurogénèse, celle-ci est encouragée à la fois par un facteur direct (augmentation de la synthèse de facteur neurotrophique) dont l'effet est de première intention, mais également par un facteur indirect (amélioration du sommeil) dont l'effet est de seconde intention.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

son obtention serait l'un des freins majeurs des programmes d'entrainement chez les personnes âgées (167–169).

Dans leur travail de 2012, Nyman et Victor ont voulu compléter les résultats de revues Cochrane évaluant l'efficacité de programmes de prévention des chutes chez des personnes âgées en renseignant l'engagement et la participation des séniors à ces programmes, précisant à juste titre qu'un programme n'est efficace que s'il est réalisé (167). Ils se sont intéressés à l'adhésion, à la compliance (via la réalisation) et à la complétion. Ainsi, le taux de recrutement médian (ou adhésion) était de 70%. Le taux d'attrition médian (ou pourcentage d'abandon) à 12 mois était de 10.9%, reflet d'une complétion médiane de près de 90% des participants. Concernant la compliance à la dose prescrite pour des exercices personnalisés, la réalisation était de 82% à 10 semaines, mais chutait à 52% à 12 mois. De cette étude, nous pouvons déduire que les personnes âgées semblent plutôt enclines à s'engager dans un programme d'entraînement physique de prévention des chutes, et n'abandonnent que peu une fois engagées, mais ne respectent pas le contenu proposé. Cependant, le taux d'abandon est contesté, avec des observations à 12 mois plutôt comprises entre 22% et 76% pour les programmes d'entraînement moteur chez des personnes âgées (169).

Certains paramètres influençant l'adhérence des séniors à la pratique d'exercices réguliers sont connus. Nous trouvons ainsi la sédentarité, l'inactivité physique et le niveau de marche faible, un indice de masse corporelle (IMC) élevé ainsi que l'appartenance à une classe socio-économique basse (169). Les auteurs précisent que ce sont des cofacteurs. Une revue systématique réunissant 41 études ajoute que le niveau d'éducation, les habitudes de vie et l'historique de pratique d'activité physique, mais surtout le degré de fragilité physique ressentie et le niveau de santé influencent eux aussi l'adhérence (170).

Ainsi, le maintien des capacités motrices d'une personne âgée lui permet de conserver une autonomie ainsi qu'une santé physique, cognitive et psychologique, ce qui assure son niveau de qualité de vie. L'encouragement à la pratique d'une activité physique plus importante chez les séniors semble être une stratégie de santé publique pertinente. Toutefois, les entraînements moteurs semblent souffrir d'un engagement, mais surtout d'une compliance et d'une complétion faibles ; ceci est particulièrement vrai pour les séniors qui en bénéficieraient le plus, à savoir les plus fragiles, sédentaires et inactifs.

Les entraînements moteurs proposés dans les études précédemment citées sont généralement proposés selon des modalités correspondant aux recommandations internationales pour la prescription d'activité physique, avec une durée d'exercice de 30 à 90 minutes, une fréquence d'exercice de 2 à 3 entraînements par semaines durant plusieurs mois.

2.3. Effets des entraînements en DT

Au vu des effets bénéfiques des entraînements cognitifs et moteurs sur les fonctions tant cognitives que motrices, mais également psychosociaux, la combinaison des deux types d'entrainements semble intuitive et a rapidement été proposée ; nous parlons alors d'entraînement en DT. La question qui en découle est alors de connaître le niveau d'efficacité de la combinaison des deux types d'entraînements par rapport à leurs réalisations séparées, puis de savoir si un entrainement en DT peut avoir des effets bénéfiques sur les capacités de DT (figure 9).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

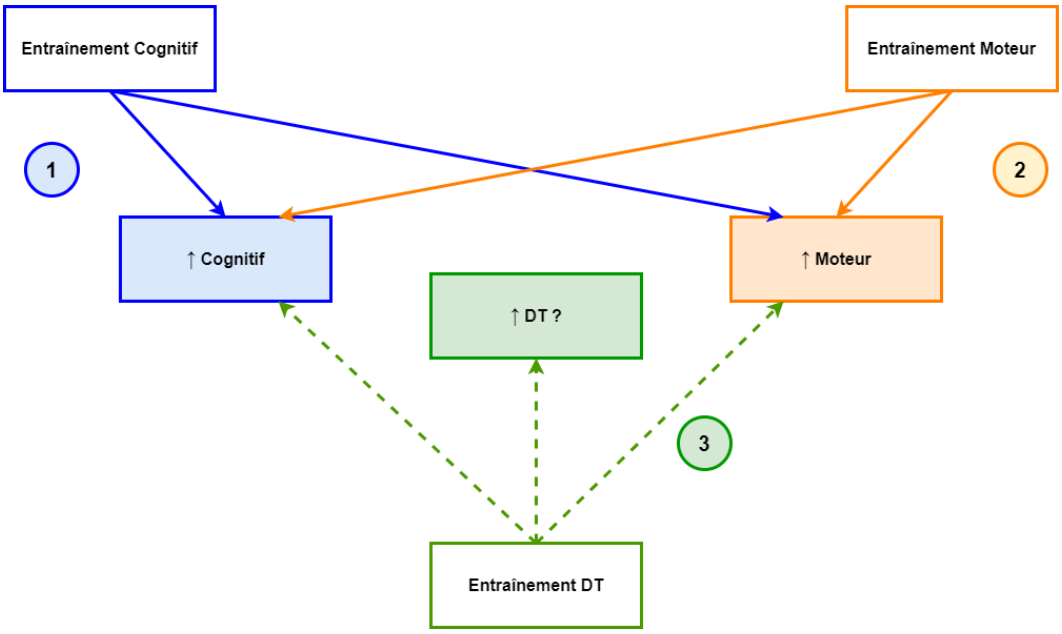


Figure 9 : Intérêt potentiel des entraînements en DT

Les entraînements en DT (3) sont-ils plus ou moins efficaces que les entraînements cognitifs (1) et les entraînements moteurs (2) sur les capacités cognitives, motrices, et de DT ?

De la même façon que pour les situations de DT, il est important de noter que nous ne parlerons ici que d'entraînements en situation de « double tâches cognitivo-motrices simultanées », bien que certains auteurs considèrent que les entraînements en séquentiel sont des entraînements en DT (73–76). Nous avons fait ce choix, car les entraînements combinant deux tâches motrices ou proposant des tâches cognitivo-motrices séquentielles ne peuvent selon nous pas induire d'ICM suivant le modèle en volume ou en temps.

2.3.1. Effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives

De nombreuses recherches ont été menées quant aux effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives des séniors, et ce dès 2009 (171). Nous trouvons même des travaux sur cette notion datant de 2002 (172) ; toutefois, les exercices cognitifs et moteurs ne sont pas réalisés simultanément, mais séquentiellement dans cette dernière étude. Ainsi, différents auteurs ont identifié la nécessité de synthèse d'une thématique d'intérêt croissant. Selon trois revues systématiques récentes, les entraînements en DT seraient efficaces pour améliorer les fonctions cognitives chez des séniors sains (73–75), plus (73,74) ou autant (75) que des entraînements en ST ou des groupes contrôles actifs et inactifs. Ceci concernait l'attention, la mémoire, les fonctions exécutives, la vitesse de traitement, les capacités visuospatiales et la cognition globale comme critères de jugement.

Dans leur travail de 2017, Levin et al. ont étudié les bénéfices de différents types d'exercices sur les fonctions motrices et cognitives chez des sujets âgés (74). Dans cette revue systématique de la littérature, 9 études parmi 19 étaient des entraînements en DT combinant des exercices en aérobie, en force, ou d'équilibre avec des exercices d'attention, de mémoire, de flexibilité mentale, de fluence verbale. Les résultats indiquent que la réalisation simultanée d'exercices cognitifs et moteurs permet bien une amélioration des fonctions cognitives telles

Licence CC BY-NC-ND 3.0

que la vitesse de traitement, les fonctions exécutives, l'attention et la mémoire. Ces gains cognitifs sont supérieurs à ceux induits par des entraînements moteurs en ST.

Dans leur revue systématique de la littérature, Joubert et Chainay se sont intéressées à la comparaison directe entre les effets d'entraînements cognitifs et moteurs combinés et ces mêmes entraînements réalisés indépendamment (73). Ce travail synthétisait les résultats de 33 études proposant des entraînements cognitifs, 10 études proposant des entraînements moteurs, et 11 études proposant des entraînements en DT. Les paramètres cognitifs étudiés étaient l'attention, la vitesse de traitement, la mémoire, les fonctions exécutives et la mémoire visuospatiale. Les résultats montrent une complémentarité et des bénéfices supérieurs en faveur des entraînements en DT comparés à ceux des entraînements physiques ou cognitifs similaires en ST.

Enfin, l'étude de Zhu et al. renforce ces observations avec la réalisation d'une méta-analyse regroupant 20 études et 2667 participants (75). Au sein des études incluses, les exercices physiques étaient de type aérobie, force et équilibre. Les exercices cognitifs étaient principalement multi-domaines et ne ciblaient pas une fonction précise, mais plutôt la cognition globale. Les modalités d'entraînements étaient très variées, allant de 6 à 96 semaines, avec 12 à 672 sessions d'entraînement. L'analyse statistique nous indique que l'effet combiné des entraînements en DT est plus important que celui des entraînements moteurs en ST (*standardized mean difference* SMD = 0.38, 95% CI -0.02 – 0.78, $p < 0.01$), et est équivalent aux entraînements cognitifs en ST (SMD = 0.22, 95% CI 0.06-0.38, $p = 0.63$) pour l'amélioration des performances cognitives.

Ces bénéfices cognitifs induits par les entraînements en DT, supérieurs aux entraînements moteurs isolés et pouvant être équivalents aux entraînements cognitifs, s'expliqueraient par l'augmentation du flux sanguin cérébral durant l'activité physique et par une augmentation des taux de BDNF durant 10 à 60 minutes après l'activité physique (173), expliquant l'intérêt des entraînements en DT (174) qui induisent des effets cognitifs synergiques (175) et augmentent la neuroplasticité (176,177).

2.3.2. Effets des entraînements en DT sur les capacités motrices

Des travaux ont également émergé dès 2011 concernant les effets des entraînements en DT sur les capacités motrices chez les séniors (178). À nouveau, différents auteurs ont identifié la nécessité de synthèse d'une thématique d'intérêt croissant. Selon deux revues systématiques récentes, les entraînements en DT seraient efficaces pour améliorer les fonctions motrices chez des séniors sains (74,179), plus (179) ou autant (74) que des entraînements en ST. Ceci concernait la force, la marche, la mobilité, le contrôle postural et l'équilibre, ainsi que le risque, la peur et les facteurs de risques de chutes.

Les travaux de Levin et al. sont les mêmes que vus précédemment, étudiant les bénéfices de différents types d'exercices sur les fonctions motrices et cognitives chez des sujets âgés (74). Ici encore, les résultats indiquent que la réalisation simultanée d'exercices cognitifs et moteurs permet bien une amélioration des fonctions motrices telles que la mobilité, la vitesse et la variabilité de marche, l'équilibre, ou la diminution du coût de DT.

Wang et al. ont réalisé une méta-analyse regroupant 30 études et 1206 participants pour déterminer l'impact des entraînements en DT sur les performances motrices et la réduction

Licence CC BY-NC-ND 3.0

des risques de chutes chez les séniors (179). Les calculs des écarts moyens standardisés (SMD) indiquent un avantage pour les entraînements en DT pour le taux de chutes, la vitesse de marche, la longueur et la cadence du pas, le test de *timed-up and go* (TUG), le contrôle postural et le temps de réaction, comparés à des groupes contrôles d'entraînement en ST.

Ces bénéfices moteurs induits par les entraînements en DT au moins équivalents aux entraînements moteurs en ST s'expliqueraient par un niveau de sollicitation physique suffisant lors des exercices (74,179). Ces résultats sont d'autant plus pertinents face à la difficulté d'atteindre le même niveau de sollicitation physique en DT comparé à de la ST. Effectivement, l'ICM réduit les performances des participants, d'autant plus chez des séniors atteignant l'ICM plus rapidement, les poussant à utiliser des stratégies de priorisation afin de se préserver des chutes.

2.3.3. Effets des entraînements en DT sur les capacités de DT

Comme nous l'avons décrit, de nombreux travaux se sont intéressés aux effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives et/ou motrices de participants séniors. Toutefois, il est étonnant que les travaux cités précédemment ne se soient pas intéressés aux conséquences de l'entraînement en DT sur les capacités de DT. D'autres auteurs ont porté leur attention sur ce point.

Hiyamizu et al. ont par exemple proposé en 2012 un protocole comparant les effets d'un entraînement d'équilibre postural sur différentes fonctions cognitives et/ou motrices suivant qu'il était réalisé en ST ou en DT auprès de 43 personnes âgées réparties en deux groupes (180). Les participants réalisaient 3 mois d'entraînement à raison de 2 séances d'une heure par semaine. Dans le groupe contrôle en ST, les participants réalisaient des exercices de force et d'équilibre sur des surfaces planes ou des tapis d'entraînement. Les participants du groupe expérimental en DT réalisaient les mêmes exercices, mais avec cette fois une tâche cognitive supplémentaire concomitante : calculs mentaux, recherche de différences entre des images, ou fluence verbale d'énumération. Les résultats de cette étude montrent que les entraînements en ST et en DT permettent une amélioration des fonctions motrices chez les séniors notamment d'équilibre. Mieux : seuls les entraînements en DT permettent une amélioration des performances en DT. Cette différence était observée par le taux de bonnes réponses au test de Stroop réalisé lors du maintien fixe d'une position debout, soit le ratio de réponses correctes ramenées au nombre de réponses reçues.

D'autres travaux du même type ont suivi, et tout ceci a fait l'objet de différentes synthèses de la littérature. Ainsi, selon trois revues systématiques récentes, les entraînements en DT seraient efficaces pour améliorer les capacités de DT chez des séniors sains (76,181,182), plus efficaces que des entraînements en ST. Ceci concernait le contrôle postural, l'équilibre, la mobilité ainsi que la marche en situation de DT.

Dans leur travail de 2014, Agmon et al. ont synthétisé les résultats de travaux s'intéressant aux interventions conduites chez des séniors afin d'améliorer leurs capacités de contrôle postural en situation de DT (181). Cette revue systématique de la littérature regroupe 22 études combinant des exercices de marche, de travail d'équilibre et de la mémoire de travail, d'opération mentale ou de fluence verbale. Les résultats indiquent que les entraînements en

Licence CC BY-NC-ND 3.0

DT permettent une amélioration du contrôle postural en situation de DT, alors que les entraînements en ST ne le permettent pas.

Dans leur revue de la littérature, Wollesen et Voelcker-Rehage ont poussé cette analyse, en s'intéressant aux modalités d'entraînements les plus efficaces. Elles ont comparé à la fois des situations de ST et de DT, mais aussi des entraînements spécifiques et généraux[11] (182). Regroupant 13 études interventionnelles, cette revue nous indique que les entraînements en DT sont supérieurs aux entraînements en ST pour l'amélioration des performances de contrôle postural en DT, et égaux pour les performances de marche en DT. De plus, les entraînements généraux et variés seraient les plus efficaces.

Plummer et al. ont réalisé une méta-analyse en 2015 portant sur la comparaison des bénéfices apportés par des entraînements en DT et en ST sur les performances de marche en DT. Ce travail réunissait 911 participants répartis dans 21 études. Les interventions couplaient des exercices de marche, d'équilibre, de coordination, de force ou aérobie avec du travail d'arithmétique, de compréhension, de fluence verbale ou de mémoire de travail. L'analyse statistique nous indique que l'effet combiné des entraînements en DT est plus important que celui des entraînements moteurs en ST (SMD = 0.11, 95% CI 0.07 – 0.15, $p < 0.001$) pour l'amélioration des performances de vitesse de marche en DT.

Ainsi, il semble confirmé que les entraînements en DT permettent d'augmenter les performances en DT des séniors, plus que les entraînements en ST. Cependant, il n'est pas facile de déterminer l'élément actif de ces entraînements (183). Il est ainsi difficile de déterminer si c'est l'aspect moteur, ou l'aspect cognitif de l'exercice, ou bien encore la combinaison des deux qui est efficace sur des critères de jugements moteurs, cognitifs ou en DT.

Tout ceci a fait l'objet d'une publication de revue systématique de revues systématiques (ou *overview*) publiée précédemment (184) présentée en annexe 1.

Article 1 : 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.

Dans ce travail de synthèse, nous avons regroupé toutes les revues systématiques traitant des effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives, physiques et de DT des séniors. Nous avons inclus 18 études, soit une synthèse sur 28446 participants une fois le recroisement (ou *overlapp*) pris en compte, considéré comme « mince » avec un calcul d'aire couverte corrigée à 0.05. Globalement, les entraînements en DT peuvent être recommandés pour améliorer les capacités cognitives, motrices et de DT chez des séniors sains (voir figure 10).

[11] Les entraînements spécifiques ou sélectifs sont des entraînements dont le contenu sera exclusivement constitué d'exercices orientés vers la fonction que l'on souhaite entraîner. À l'inverse, les entraînements généraux ou multi-domaines ne sont pas spécifiquement conçus pour entraîner une fonction précise, mais sont constitués d'exercices divers aux objectifs pouvant varier (182).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

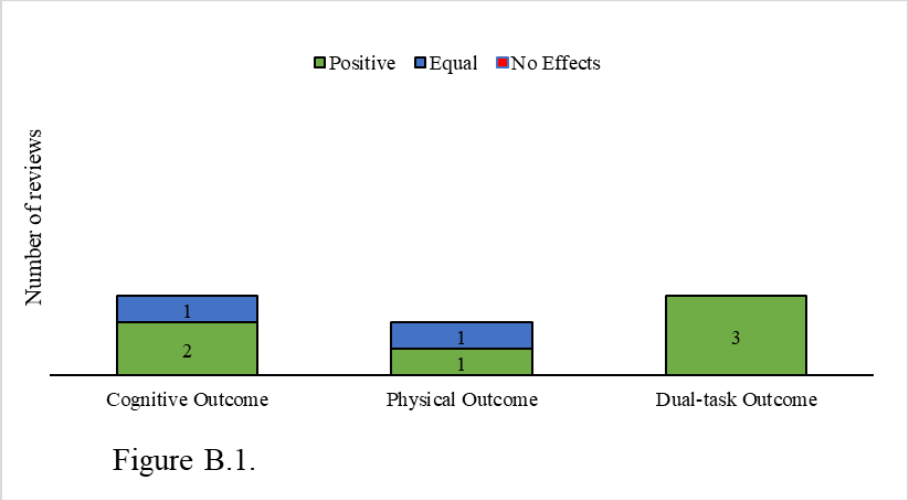


Figure 10 : Résumé des effets des entraînements en DT sur les capacités cognitives, physiques et de DT chez les séniors (184)

Cette *overview* nous a également permis de mettre en lumière un manque de connaissances. Ainsi, la nécessité de supervision, le niveau de risque, l'utilisabilité à domicile ainsi que le niveau d'adhésion aux interventions proposant un entraînement en DT n'étaient presque jamais reportés dans les revues systématiques. De plus, les effets à long terme restent incertains. Certains auteurs rapportent des bénéfices maintenus à plusieurs semaines voire plusieurs mois, d'autres un déclin très rapide des bénéfices obtenus.

Depuis la publication de ce travail, la littérature continue à aller dans ce sens. De nombreuses revues systématiques de littérature ont été publiées entre 2020 et 2022, confirmant les effets bénéfiques des entraînements en DT sur la cognition (185,186), en particulier les fonctions exécutives (185,187) et l'inhibition mentale (185,188) ; mais aussi sur les performances motrices (186), en particulier l'équilibre et la marche (189). En parallèle, l'étude des effets des entraînements en DT sur les performances en DT se poursuit également, apportant toujours plus d'arguments à leur intérêt (190). Cette récente intervention contrôlée randomisée réalisée auprès de 87 personnes âgées nous indique que les entraînements en DT permettent de diminuer le coût de maintien de DT.

2.3.4. Effets des entraînements en DT sur des déterminants de la qualité de vie

Si les entraînements cognitifs d'un côté et les entraînements moteurs de l'autre permettent d'améliorer de nombreux déterminants du niveau de qualité de vie des séniors, il semble logique qu'il en soit de même pour les entraînements en DT. Un certain nombre de travaux rapportent un impact positif des entraînements en DT sur la qualité de vie des séniors (191–193). Ces travaux intégraient les symptômes dépressifs au sein de l'appréciation du niveau de qualité de vie (191–193). Toutefois, il n'est pas clairement établi que les entraînements en DT aient ou non des effets bénéfiques directs sur l'anxiété ou la dépression chez les personnes âgées (194,195) ; ce point isolé semble encore peu étudié, et les résultats négatifs.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Ainsi, les personnes âgées s'entraînant en DT maintiennent leurs capacités cognitives, motrices et de DT, ce qui leur permet de rester autonomes et de s'adapter à leur environnement, maintenant leur niveau global de qualité de vie.

2.4. Différentes formes d'entraînements en DT

Certains auteurs parmi les travaux précédemment cités ont pointé du doigt la grande hétérogénéité des entraînements en DT (184), ce qui est normal au vu du nombre d'études menées sur le sujet. Pour ordre de grandeur, notre synthèse de la littérature comprenait plus de 200 études uniques (après estimation du recroisement) réparties en 18 revues systématiques (184). Ainsi, les entraînements en DT peuvent présenter de nombreuses modalités différentes en termes de dose, c'est-à-dire intensité, fréquence, répétitions, ou encore longueur. Afin d'illustrer la diversité de ce panel, nous avons sélectionné un certain nombre d'études proposant des entraînements en DT à des séniors ayant été publiées entre 2012 et 2016. Nous rassemblons et nous décrivons les modalités d'entraînement dans le tableau 1.

Étude	Modalités d'entraînement
Hiyamizu et al., 2012 (180)	Dans cet essai contrôlé randomisé, 43 participants (72 ± 4 ans) ont réalisé 2 séances de 60 minutes d'entraînement par semaine durant 12 semaines, soit 1440 minutes d'exercice. Les séances étaient supervisées et consistaient en des exercices de force et d'équilibre réalisées ou non avec une tâche cognitive supplémentaire concomitante : calculs mentaux, recherche de différences entre des images, ou fluence verbale d'énumération.
Pichierri et al., 2012 (196)	Dans cette étude contrôlée randomisée, 25 participants (85 ± 4 ans) ont réalisé 2 séances d'entraînement de 60 minutes par semaine durant 12 semaines, soit 1440 minutes d'exercice. Les séances étaient supervisées, collectives (groupes de 3 ou 4 participants) et consistaient en des exercices de force, d'équilibre ou de danse via un support informatique. Dans ces derniers exercices, le participant devait reproduire la suite de flèches présentées à l'écran en appuyant avec ses pieds sur les plateformes correspondantes au sol.
Uemura et al., 2012 (197)	Dans cet essai contrôlé randomisé, 18 participants (82 ± 6 ans) ont réalisé 1 séance de 30 minutes d'entraînement par semaine durant 24 semaines, soit 720 minutes d'exercice. Les séances consistaient en des entraînements de force, d'agilité et de flexibilité, puis les participants réalisaient des exercices leur demandant de changer le plus rapidement possible de modalités d'exercice en DT.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Maillot et al., 2012 (198)	Dans cet essai contrôlé randomisé, 32 participants (73 ± 3 ans) ont réalisé 2 séances de 60 minutes d'entraînement par semaine durant 12 semaines, soit 1440 minutes d'exercice. Les séances étaient collectives (réalisées en duo), supervisées, et consistaient en entraînements d'équilibre réalisés à l'aide de la Nintendo® Wii, demandant d'intégrer les consignes et les retours audios ou vidéos venant du jeu.
Hamacher et al., 2016 (199)	Dans cet essai contrôlé randomisé, 32 participants (68 ± 3 ans) ont réalisé 2 séances de 90 minutes d'entraînement par semaine durant 24 semaines, soit 4320 minutes d'exercice. Les séances étaient collectives, supervisées et consistaient en des cours de danse. L'objectif était d'apprendre de nouvelles consignes à chaque séance, ainsi que de nouvelles suites de mouvements.

Tableau 1 : Différentes modalités d'entraînements en DT

Nous présentons ici seulement 5 études prises en exemple parmi des centaines publiées sur le sujet des entraînements en DT chez des séniors depuis 2006. Cette simple illustration nous permet de constater qu'en plus de la différence de dose allant de 720 à 4320 minutes d'exercice, le contenu ainsi que le support utilisé diffèrent grandement. Certains entraînements sont très analytiques (180,197), tandis que d'autres sont plus ludiques et utilisent des supports vidéo (196,198) ou bien de la danse (199).

Ainsi, les entraînements en DT peuvent être pratiqués sous différentes formes, à l'aide de différents supports. Nous pouvons citer les entraînements « corps-esprit » (ou *body mind exercise*), comme le tai-chi, le yoga, ou certains arts martiaux (183,200,201). Ces entraînements corps-esprits consistent en une association entre des exercices physiques et une sollicitation cognitive, avec une attention particulière apportée à la respiration, et présentent des effets bénéfiques sur les fonctions cognitives (202,203) et motrices (202) chez les séniors. Mais l'on retrouve également la danse (199) – pouvant être considérée comme une forme d'entraînement en DT (204) – et certains jeux nécessitant des mouvements de la part des participants (196,198) au sein des entraînements en DT. Il est intéressant de noter que ces différentes formes peuvent se mélanger et s'entremêler, comme dans cette récente étude de Liu et al. proposant un protocole de tai-chi à des sujets âgés reposant sur un *exergame* (205). Torre et Temprado ont proposé en 2022 une catégorisation de ces entraînements en DT suivant 7 éléments clefs déterminant collectivement leur efficacité (206). Ces éléments regroupent le type de stimuli dans l'intervention, les caractéristiques et l'organisation des entraînements, les domaines ciblés par l'entraînement, les marqueurs d'efficacité utilisés, et les résultats obtenus suivant les domaines. S'ajoutent à ce modèle les paramètres modérateurs et les mécanismes d'action agissant sur les différents éléments précédents.

Nous allons particulièrement nous intéresser aux jeux dans la partie à venir, car ils pourraient répondre à la problématique de l'adhérence aux programmes d'entraînement que l'on rencontre chez les sujets âgés, avec un attrait et un plaisir importants (207–209), ainsi qu'une complétion et une compliance élevées (207,209–212).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé de la Partie 2

Les entraînements cognitifs et moteurs consistent en la répétition d'exercices aux modalités variées dans le temps en vue de l'amélioration des capacités. Chez les séniors, les entraînements cognitifs ainsi que les entraînements moteurs permettent une amélioration des capacités tant cognitives que motrices : amélioration de la mémoire, de la mémoire de travail, de l'attention, de la vitesse de traitement, de l'inhibition et de la flexibilité mentale, mais aussi du contrôle postural et de l'équilibre, de la marche, de la mobilité, du temps de réaction et de la force musculaire. Des bénéfices ont également été observés sur la santé mentale et la qualité de vie. Toutefois, l'adhérence, notion comprenant adhésion, compliance et complétion, est le frein principal aux programmes d'entraînement chez les séniors.

Il a rapidement été proposé de combiner ces deux modalités d'entraînement ; ce sont les entraînements en situation de DT. Ces entraînements se sont à leur tour révélés efficaces pour l'amélioration des capacités cognitives et motrices, mais également de DT et sur la qualité de vie des séniors. Ces entraînements peuvent prendre un nombre important de formes et de supports, parmi lesquels des jeux dont la ludicité pourrait permettre de répondre à la problématique d'adhérence.

Ces entraînements en DT semblent donc pertinents dans le maintien des fonctions, et donc dans la lutte contre la perte d'autonomie et l'arrivée à un seuil de dépendance des personnes âgées (figure 11).

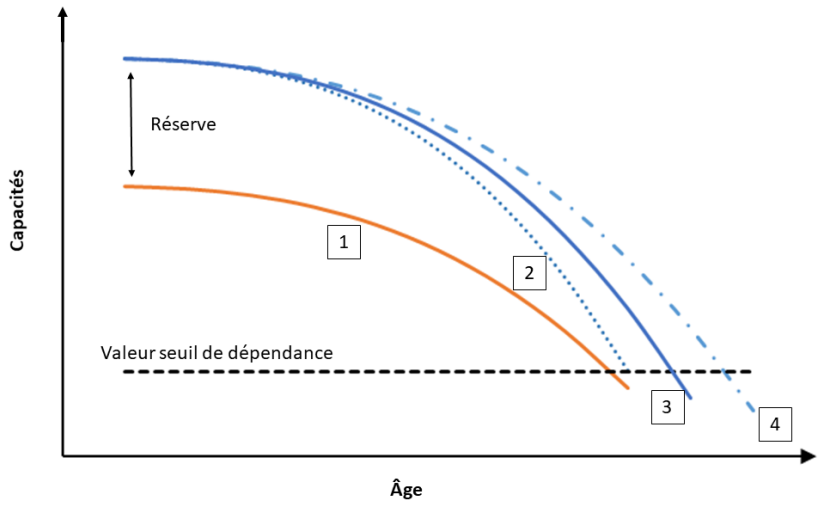


Figure 11 : Déclin des capacités motrices, cognitives et de DT avec l'âge, et l'effet des entraînements – adapté du modèle « 1 + 2 + 3 » de Bouchon (213)

3 : vieillissement normal, 4 : déclin ralenti par l'entraînement (moteur, cognitif ou en DT), 2 : déclin accéléré par une pathologie, 1 : réserve plus basse (capacités initiales).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

3. Les *exergames*

Les entraînements en DT seraient donc efficaces pour améliorer les capacités cognitives, motrices et de DT chez des séniors sains, et pourraient présenter un intérêt particulier concernant leur attractivité. Mais quel type d'entraînement en DT choisir parmi tous ceux qui existent ? C'est ce que nous abordons dans cette partie, en définissant les *exergames*, leurs particularités, puis en détaillant leur niveau d'efficacité et leurs spécificités.

3.1. Définition des *exergames*

Comme nous l'avons vu précédemment par l'exemple des études de Pichierri et al. (196) et de Maillot et al. (198), un programme d'entraînement en DT peut être proposé par le biais d'un jeu vidéo. C'est ce que nous appelons un *exergame*, un terme abrégé pour *exercise games*, c'est-à-dire des jeux nécessitant une activité physique pour être pratiqués (214).

Le champ des *exergames* est vaste. Ils peuvent prendre comme support des objets réels, comme la marelle ou le jeu de l'oie utilisés dans l'étude de Mouton et al. (215), ou bien des objets virtuels, des projections ou des supports vidéo (216) – nous parlons alors d'*exercise video games* ou *active video games*. Ces jeux vidéo actifs peuvent être immersifs comme dans les casques de réalité virtuelle ou de réalité augmentée, ou non immersifs dispensés sur un écran fixe et plat. De plus, les jeux vidéo actifs peuvent utiliser des supports *hardware* (matériel) et *software* (logiciel) commerciaux, ou non (217). Enfin, les *exergames* peuvent être ou non des *serious games*, c'est-à-dire des jeux combinant une activité sérieuse comme un entraînement à des ressorts ludiques. Afin d'éclaircir ce point et de fournir des illustrations, nous proposons une vue d'ensemble de cette nomenclature accompagnée d'exemples en figure 12.

La figure se lit de la manière suivante : la simulation de kayak proposée dans une étude de Park et al. est un jeu vidéo actif non commercial et non immersif, un croisement entre *exergame* et jeu vidéo (218). Comme nous pouvons le remarquer dans cette figure, les jeux vidéo actifs non commerciaux ne sont pas fréquemment utilisés à des fins non sérieuses ; ceci s'explique par le coût et la difficulté que représente leur développement, justifiant rarement une utilisation purement récréative.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

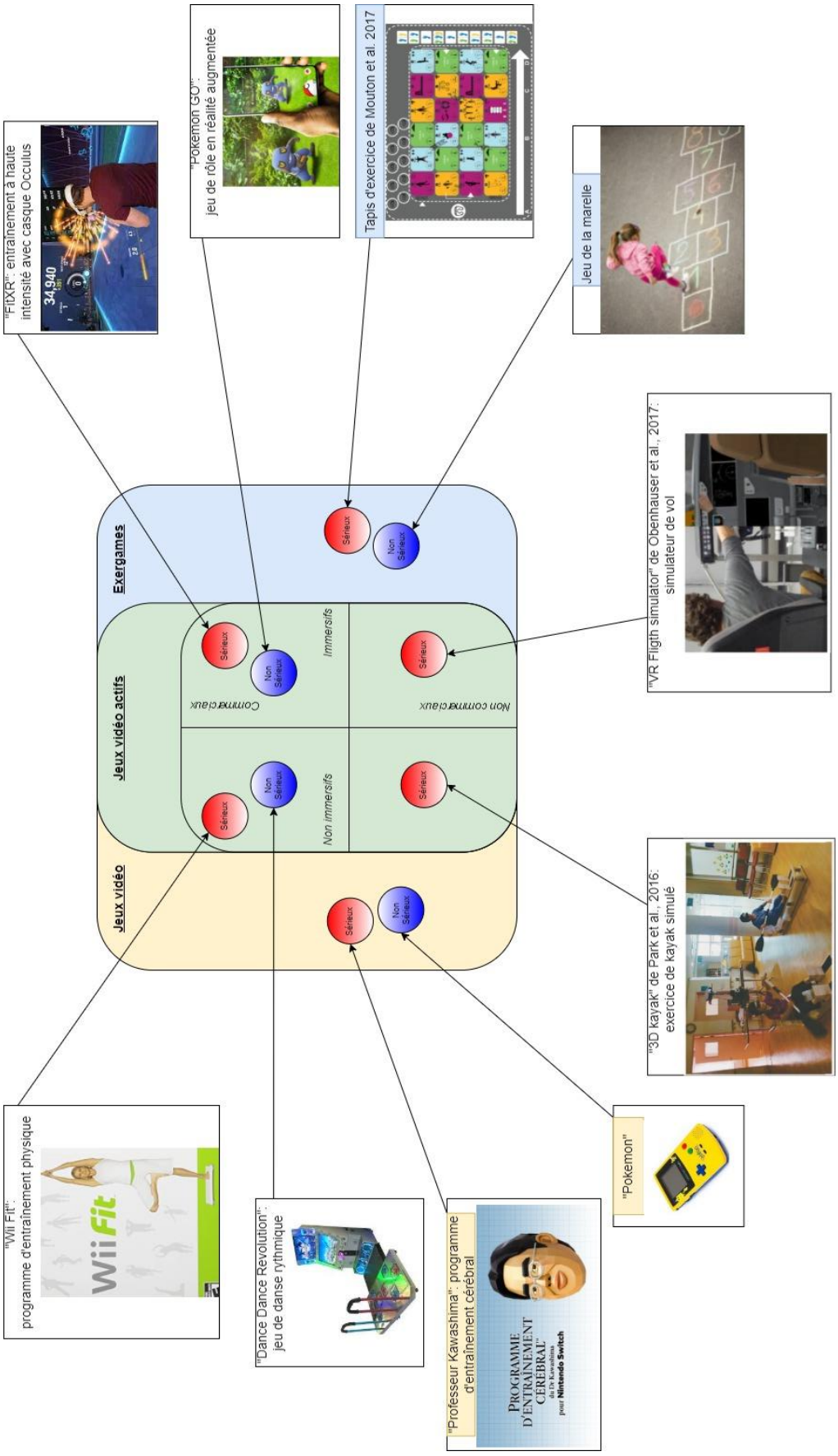


Figure 12 : Nomenclature autour des jeux, qu'ils soient vidéo, d'exercice, sérieux, immersifs, commerciaux, ou non – illustrations issues de travaux (215,218,219)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dans la suite de ce manuscrit, nous utiliserons par abus de langage et par souci de lecture le raccourci « *exergames* » pour désigner des jeux vidéo actifs sérieux non immersifs. Ceci est proche de la définition de Kappen et al. des *exergames* comme « toute combinaison de technologies de jeu et de programmes d'exercices ayant pour objectif la motivation à l'activité physique de groupes ou d'individus » (220). Selon cette définition, les *exergames* peuvent prendre de nombreuses formes ; nous l'abordions déjà en figure 12 et l'illustrons plus précisément en figure 13.

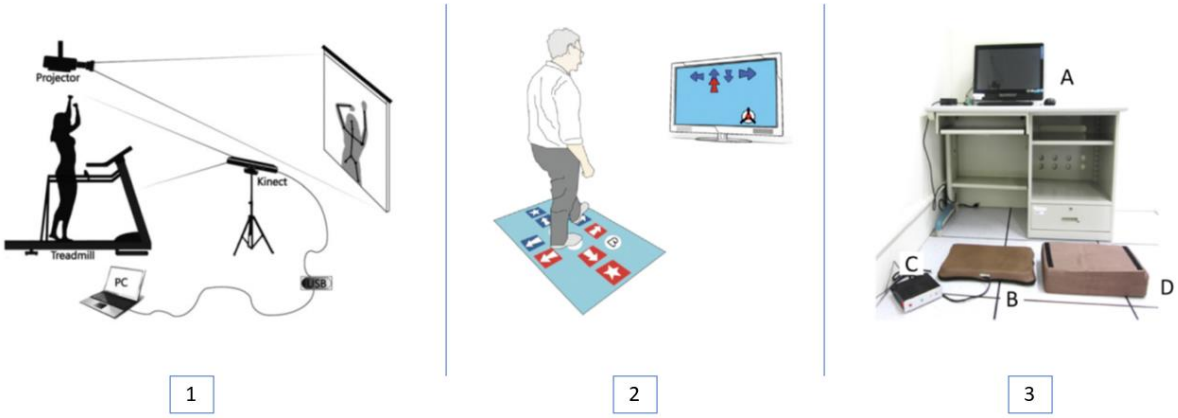


Figure 13 : Différentes formes possibles d'*exergames* – illustrations issues de travaux (221–223)

Quelques exemples de formes d'*exergames* – de nombreuses autres existent. 1 : Utilisation d'une Microsoft® Kinect couplée à une vidéo projecteur et un tapis de marche (221). 2 : Utilisation d'une surface sensible couplée à un écran, inspiré du Dance Dance Revolution (222). 3 : Utilisation d'une plateforme de stabilométrie couplée à un écran, inspiré de la Nintendo® Wii (223).

3.2. Efficacité des *exergames*

Aux définitions précédentes s'ajoute une autre caractéristique : les *exergames* sont une forme particulière d'entraînement en DT car ils contiennent intrinsèquement des éléments cognitifs mis en évidence par des processus corticaux (224). Toutefois, le niveau d'efficacité des *exergames* n'est pas nécessairement équivalent à celui des DT dits « classiques » sur les paramètres précédemment abordés chez les séniors ; c'est ce que nous développerons dans cette partie.

3.2.1. Effets des *exergames* sur les capacités cognitives

Des travaux concernant l'intérêt des *exergames* sur les capacités cognitives des séniors ont vu le jour dès 2004, avec l'étude de Lajoie et al. évaluant les effets d'un entraînement d'équilibre postural informatisé sur les capacités attentionnelles (225). Dans les années 2010, de nombreux travaux ont vu le jour avec l'essor des solutions commerciales types Nintendo® Wii (226) ou Dance Dance Revolution (227). Ces travaux ont rapidement été synthétisés. Selon trois revues systématiques récentes, les *exergames* seraient efficaces pour améliorer les fonctions cognitives chez des séniors sains (207,212,228), autant (212,228) que des entraînements en ST ou des groupes contrôles actifs et inactifs. Ceci concernait l'attention, la

Licence CC BY-NC-ND 3.0

mémoire, les fonctions exécutives, la vitesse de traitement, les capacités visuospatiales et la cognition globale comme critères de jugement.

L'équipe de Schoene et al. a étudié en 2014 les effets des *exergames* sur les facteurs cognitifs impliqués dans le risque de chute chez des séniors sains (228). Cette revue systématique de la littérature regroupait 37 essais contrôlés randomisés, soit 1066 participants. Les *exergames* seraient efficaces pour améliorer les fonctions exécutives, l'attention, et la cognition globale. Ces gains seraient équivalents à ceux des entraînements en ST.

Dans leurs travaux de 2015, Bleakley et al. se sont intéressés aux effets des *exergames* sur les capacités cognitives de séniors sains (207). Cette revue systématique de la littérature avec méta-analyse de 12 études interventionnelles auprès de 455 participants indique que les *exergames* sont efficaces comme entraînement de la cognition globale, les fonctions exécutives, la mémoire et l'attention. Les *exergames* seraient de plus non dangereux, avec aucun enregistrement d'évènement indésirable grave lié au jeu.

Enfin, Stojan et al. en 2019 ont eux aussi réalisé une synthèse de la littérature concernant les effets des *exergames* sur les capacités cognitives de séniors sains, telles que la mémoire, les fonctions exécutives, les performances visuospatiales ainsi que la vitesse de traitement (212). Réunissant 750 participants à travers 15 études, leurs résultats montrent que les *exergames* sont efficaces pour l'amélioration de la cognition et des fonctions cérébrales, en particulier concernant les fonctions exécutives, plus sensibles aux exergames qu'aux entraînements traditionnels.

Les effets des *exergames* sur les capacités cognitives semblent relativement peu étudiés, car bien qu'intrinsèquement induite (224), la tâche cognitive serait considérée comme secondaire dans la majorité des cas (210). Toutefois, les résultats des 3 revues systématiques précédentes sont tous en faveur des *exergames*. En ce sens, deux revues ayant directement comparé les *exergames* aux DT classiques les ont trouvés plus efficaces (200,229). De plus, la plupart des études qui s'intéressent aux *exergames* évaluent leurs effets sur les fonctions exécutives (212,230), mais ils semblent avoir également des effets sur la cognition et l'humeur avec une réduction des symptômes dépressifs et de la dépression (231).

Les bénéfices des *exergames* sur les capacités cognitives des séniors seraient dus aux mêmes phénomènes physiologiques induits par l'activité physique que lors d'entraînements en DT (212). Ainsi selon Monteiro-Junior, les *exergames* entraîneraient une augmentation du flux sanguin cérébral, de l'oxygénation, du taux de BDNF, d'IGF-1 et de *vascular endothelial growth factor* (VEGF) (232). Ceci aurait pour conséquence une augmentation de la neuroplasticité et une amélioration des performances du réseau neuronal. Selon ce même auteur, la neuroplasticité serait augmentée par l'immersion et la réalité virtuelle dont la sollicitation cognitive importante augmenterait la libération de facteurs trophiques centraux (233).

3.2.2. Effets des *exergames* sur les capacités motrices

Assez logiquement, d'autres travaux ont vu le jour à la même période s'intéressant aux effets des *exergames* sur les capacités motrices de séniors, utilisant à nouveau principalement les systèmes Nintendo® Wii (234) ou Dance Dance Revolution (196). Ces travaux de Pichierri et al. ainsi que de Toulotte et al. ne sont qu'une infime fraction des très nombreuses études ayant

Licence CC BY-NC-ND 3.0

été menées à ce jour. Le besoin de synthèse sur ce sujet a depuis donné lieu à dix revues systématiques. Selon elles, les *exergames* auraient un niveau d'efficacité discuté pour améliorer les fonctions motrices chez des séniors sains (207–211,228,235–238). Effectivement, ils seraient supérieurs (209,236), équivalents (210,211,228,238), voire inférieurs (237) à des entraînements en ST ou des groupes contrôles actifs et inactifs.

Selon deux revues systématiques de la littérature avec méta-analyse, les *exergames* seraient supérieurs à des entraînements traditionnels d'équilibre concernant l'amélioration de l'équilibre (209,236), la mobilité (209) et la peur de tomber (236) chez des séniors.

Ces résultats sont contrebalancés par un certain nombre de revues systématiques avec ou sans méta-analyse qui observent une efficacité des *exergames*, mais non supérieure à des entraînements en ST. Selon ces études, les *exergames* seraient efficaces pour l'amélioration du contrôle postural, de l'équilibre et de la mobilité (207,208,210,211,228,238), de la peur de tomber (207,208,238) ainsi que du passage du pas (228) chez des séniors sains.

À l'inverse, dans leur méta-analyse Donath et al. trouvent les *exergames* efficaces pour entraîner l'équilibre et la mobilité, mais moins efficaces que des programmes d'équilibre traditionnels en ST (237). Rodrigues et al. vont plus loin, n'observant aucun effet des *exergames* sur la mobilité ou l'équilibre (235).

D'autres travaux narratifs sont à citer. Par exemple, deux revues se sont intéressées aux effets des *exergames* sur les chutes et facteurs de risques de chutes chez les séniors (239,240). Ces travaux nous confirment que les *exergames* seraient efficaces pour la prévention des chutes des séniors, avec un niveau au moins comparable à des programmes d'entraînement traditionnels. En ce sens, une revue systématique de 2021 portant sur l'impact des *exergames* sur la peur de tomber des séniors, synthétisant les résultats de 23 études, nous indique que plus des deux tiers de ces études montrent un effet positif (241).

Parallèlement, les *exergames* seraient probablement efficaces pour encourager l'activité physique des personnes, bien que ce point soit discuté. La première intuition en ce sens date de 2011, reposant sur l'aspect social et interactif des *exergames* (242). Puis des auteurs se sont intéressés à la modulation comportementale en lien avec la santé que peuvent produire les *exergames* tant chez les enfants que chez les adultes (243). Les résultats étaient peu concluants, avec seulement 3 études parmi 30 montrant une augmentation de l'activité physique chez les participants. Toutefois, une récente étude pilote s'intéressant à l'impact d'un programme d'entraînement utilisant un *exergame* comme support chez des séniors a mis en évidence une augmentation du niveau d'activité physique, des bénéfices perçus et du niveau de réussite (ressentis et auto rapportée dans les trois cas) (244). Dans une autre étude récente, les auteurs se sont intéressés aux changements comportementaux à court et à long terme suivant le type d'entraînement pratiqué, à savoir *exergame* ou traditionnel chez 55 jeunes adultes (245). L'autonomie et la motivation intrinsèque étaient augmentées à court et long terme de façon significativement plus importante pour le groupe interventionnel que pour le groupe contrôle.

3.2.3. Effets des *exergames* sur les capacités de DT

Paradoxalement, il existe peu de travaux s'intéressant aux effets des *exergames* - une forme particulière d'entraînement en DT - sur les capacités de DT chez les séniors. À l'échelle de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

revues de la littérature, aucune parmi celles publiées jusqu'en 2021 n'a abordé ce sujet. Ceci s'explique par une quantité de littérature primaire trop faible, probablement motivée par l'absence d'évaluation standardisée en DT (76,181,182). Il existe tout de même de rares travaux, comme l'essai contrôlé randomisé de Wang et al. publié en 2021 (221). Dans cette récente étude, 20 séniors sains réalisaient 60 minutes d'entraînement, 3 fois par semaine durant 12 semaines. Cet entraînement était un entraînement en DT utilisant un *exergame* (Microsoft® Kinect associé à un tapis de marche) pour support dans le groupe expérimental, ou un entraînement à composants multiples pour le groupe contrôle : travail aérobie, d'équilibre et de renforcement musculaire. Le critère de jugement principal était une évaluation en DT : la réalisation d'un TUG tout en décomptant de trois en trois à partir d'un multiple de 8. Les critères de jugements secondaires étaient une évaluation des fonctions exécutives d'inhibition (Stroop test) et de flexibilité mentale (*Trail Making Test* TMT), ainsi qu'une évaluation de marche sur 400 mètres. Après les 12 semaines d'entraînement, les deux groupes avaient augmenté significativement leurs performances cognitives, motrices et en DT. Plus important, le groupe expérimental utilisant l'*exergame* présentait une amélioration significativement plus élevée dans toutes les composantes étudiées.

Globalement, les *exergames* peuvent être considérés comme recommandés pour améliorer les capacités cognitives des séniors sains, mais les effets sur les capacités motrices sont plus discutés, et les preuves concernant les capacités de DT manquent (voir figure 14).

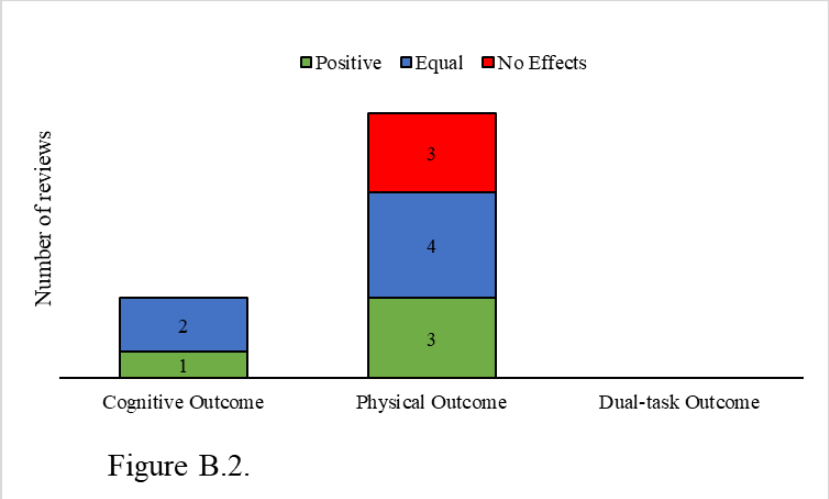


Figure 14 : Résumé des effets des *exergames* sur les capacités cognitives, physiques et de DT chez les séniors (184)

L'*overview* dont est issue cette figure nous a également permis d'observer un niveau de sécurité et d'adhésion hauts pour les *exergames*. Toutefois, de nombreuses questions restent en suspens : l'impact des *exergames* sur les capacités physiques et de DT des séniors, leur possible utilisation à domicile sans surveillance, ainsi que la possible utilisation de solutions commerciales. De plus, les effets à long terme restent peu clairs.

Depuis, la littérature continue à fournir des preuves d'intérêt des *exergames* chez les séniors. De nombreuses revues systématiques de la littérature ont été publiées entre 2020 et 2021,

Licence CC BY-NC-ND 3.0

appuyant les effets bénéfiques des *exergames* sur la cognition (246–248), en particulier sur la vitesse de traitement, l'attention et l'inhibition mentale (185). D'autres récents travaux rapportent également des bénéfices physiques et moteurs, avec une amélioration de la mobilité et de l'équilibre (249), du contrôle postural (250), de la peur de tomber (251), mais surtout de la marche (248,252,253). L'équipe de Shida et al. rapporte même une modification de l'architecture musculaire avec une augmentation de la surface de coupe des muscles ischio-jambiers, quadricipitaux et paraspinaux chez des séniors après plusieurs semaines d'entrainement via *exergame* (254). Ceci vient confirmer des travaux précédents, qui rapportent une augmentation de la force musculaire chez les séniors grâce à l'utilisation d'*exergames* (255,256). Il est intéressant de noter que Torre et Temprado ont également proposé en 2022 une catégorisation des *exergames* suivant 7 éléments clefs déterminant collectivement leur efficacité (257). Ces éléments regroupent le type de stimuli dans l'intervention, les caractéristiques et l'organisation des entraînements, les domaines ciblés par l'entraînement, les marqueurs d'efficacité utilisés, et les résultats obtenus suivant les domaines. S'ajoutent à ce modèle les paramètres modérateurs et les mécanismes d'action agissant sur les différents éléments précédents.

3.2.4. Effets des *exergames* sur des déterminants de la qualité de vie

Plusieurs revues systématiques de la littérature rapportent un intérêt des *exergames* dans la lutte contre l'anxiété (254) et la dépression (231,247,258) chez les séniors. Ceci peut s'expliquer de plusieurs façons, car les *exergames* incluent différents composants. Étant des entraînements en DT, ils incluent de l'exercice physique dont les bienfaits sur la dépression ont déjà été exposés (165). Ils incluent également de l'exercice cognitif, pertinent lui aussi contre la dépression (132). Enfin, les *exergames* sont des jeux utilisant un support vidéo. En ce sens, ils permettent des interactions sociales (259), ainsi que la sécrétion d'endorphines (260) toutes deux propres aux jeux et efficaces dans la lutte contre la dépression (259,260). Avec des bénéfices cognitifs, moteurs, et sur la santé mentale, qui sont autant de paramètres déterminants de l'autonomie et de la qualité de vie, il n'est pas déroutant que les *exergames* aient un impact positif sur cette qualité de vie chez les personnes âgées (261). La différence avec les entraînements en DT dits classiques est que ces derniers semblaient eux aussi efficaces sur la qualité de vie globale des séniors, mais pas spécifiquement sur l'anxiété ou la dépression chez les personnes âgées (194,195).

Ainsi, les *exergames* pratiqués par des séniors permettraient d'entraîner leurs fonctions cognitives, motrices (bien que plus discuté), de diminuer les symptômes dépressifs et l'anxiété avec des effets bénéfiques croisés. Leur capacité à encourager la pratique d'une activité physique reste toutefois discutée. Monteiro-Junior et al. proposent un résumé des bénéfices des *exergames*, ainsi que des hypothèses neurobiologiques pour ces bénéfices (232). Nous présentons ce modèle traduit (et complété sur le volet cognitif) en figure 15.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

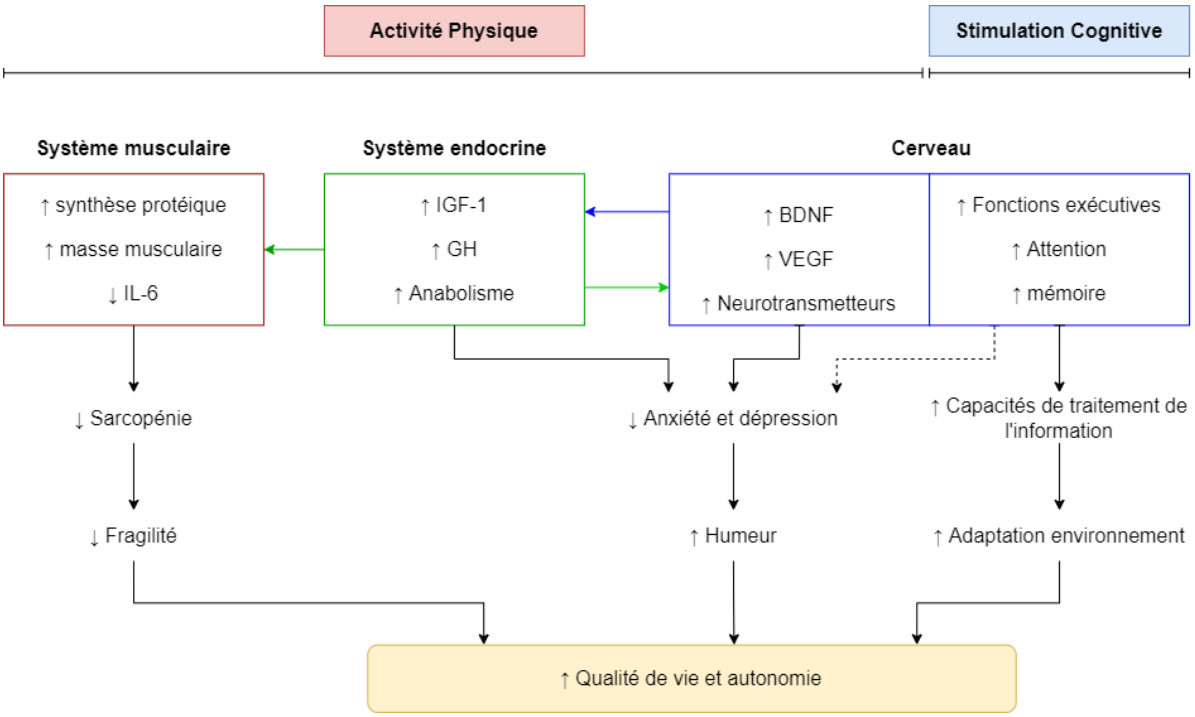


Figure 15 : Effets des *exergames* chez les séniors et hypothèses neurobiologiques – traduit et complété depuis une publication (232)

3.2.5. Sollicitation et efficacité des *exergames*

Si la relation dose-efficacité des programmes d'entraînement et aussi des *exergames* n'est pas clairement définie, il semble que les *exergames* doivent être suffisamment sollicitants eu égard aux charges cognitives et physiques afin de produire des effets (214,262). Ainsi, l'efficacité des *exergames* dépend en partie de leur intensité.

Étant une certaine forme d'entraînement en DT, les *exergames* ne devraient pas différer de ce type d'entraînement en termes de niveau de sollicitation physique. Les tâches soumises aux joueurs sont similaires, l'une étant cognitive et l'autre étant motrice, la différence résidant essentiellement dans le support utilisé. Les précédentes études portant sur cette question ont trouvé un niveau d'intensité d'exercice pour les *exergames* allant de modéré (263–266) à intense (264,265,267) chez de jeunes adultes sains. A notre connaissance, une seule étude pilote de faisabilité a été menée chez les séniors, démontrant une possible utilisation des *exergames* comme support d'entraînement à haute intensité (268). Toutefois, il semble que l'intensité varie fortement entre les différents types de jeux utilisés (267,269). Ainsi, le Nintento® Wii Bowling induit une intensité d'exercice faible (264), tandis que le Microsoft® Kinect Boxing ou le "*Your Shape Fitness Evolved 2012*" induisent une activité physique intense (265,267).

Sur le plan cognitif, une étude a mis en évidence l'activité de processus corticaux par électroencéphalographie lors de l'utilisation d'un jeu vidéo chez des sujets jeunes (224). En parallèle, deux études ont montré une activation moindre des activités corticales préfrontales par spectroscopie proche de l'infrarouge (fNIRS) après l'utilisation répétée d'un exergame comme support d'entraînement (270,271). Cette oxygénation réduite des hémi-cortex droits et gauches du cortex préfrontal était corrélée à l'amélioration des fonctions exécutives (270).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Toutefois, aucune étude à notre connaissance n'a quantifié l'activité cérébrale par électroencéphalographie ou fNIRS lors de l'utilisation d'un *exergame* par des séniors.

Ainsi, bien que le niveau d'efficacité des *exergames* dépende en partie de leur niveau de sollicitation, le pan moteur semble très variable et le pan cognitif peu étudié. Il semble alors complexe de déterminer *a priori* le niveau de sollicitation physique et cognitif d'un *exergame* non commercialisé dans ce continuum d'intensité et ce manque de connaissances.

3.3. Intérêts spécifiques des *exergames*

Quoique le niveau de sollicitation sous-jacent soit flou, un grand nombre de travaux récents s'accorde sur un effet bénéfique des *exergames* sur de nombreuses fonctions différentes chez les séniors. Toutefois, ce n'est pas leur unique intérêt. Comme nous l'avons vu, les programmes d'entraînement en activité physique souffrent de problèmes d'engagement, mais surtout de compliance et de complétion chez les séniors (167,169). Les programmes d'entraînement en activité physique seraient effectivement sujets à un certain nombre de barrières (272,273), altérant le maintien de la pratique d'une activité physique (274). Ces barrières peuvent appartenir au domaine intrapersonnel (ex : manque de temps, fatigue, peur, motivation), au domaine interpersonnel (ex : solitude dans la pratique, affect pour l'animateur), ou encore au domaine communautaire (ex : contraintes temporelles ou spatiales). Nous allons montrer que les *exergames* peuvent apporter des leviers à ces barrières.

3.3.1. L'attractivité des *exergames*

Il est important de définir ici la motivation. Il s'agit d'un processus régulant l'engagement d'un être vivant pour une activité précise. Elle en détermine le déclenchement dans une certaine direction avec l'intensité souhaitée et en assure la prolongation jusqu'à l'aboutissement ou l'interruption. Ainsi, la motivation regroupe différentes notions dans le cadre d'un entraînement, que nous avons déjà explorées réunies sous l'égide d'adhérence : l'engagement (ou adhésion), le respect du contenu (compliance), qualitatif ou quantitatif (présence ou réalisation), ainsi que la réalisation jusqu'au terme (ou complétion). L'un des freins majeurs des programmes d'entrainement chez les personnes âgées est l'adhérence, et plus particulièrement la compliance et la complétion (167,275). Un argument fort des *exergames* serait leur attractivité, c'est-à-dire leur capacité à susciter un intérêt chez le public cible. L'adhérence des personnes âgées aux programmes utilisant des *exergames* semble être supérieure à celle des interventions conventionnelles (238). Ceci serait dû aux retours continus et instantanés (276) ainsi qu'à l'aspect amusant des exergames (277), qui augmente le taux d'adhésion et de complétion des personnes en augmentant leur plaisir à participer (276,277).

Comme nous l'avons vu, les *exergames* utilisés dans le cadre d'un entraînement en DT deviennent alors des *serious games* dont l'objectif est l'entraînement des capacités tant cognitives que motrices, se servant de la ludicité du jeu vidéo. Ceci se base sur la théorie de la ludification[12] (ou *gamification*), c'est-à-dire « l'utilisation d'éléments issus de jeux dans un contexte autre que le jeu » (278). La ludification de la pratique d'activité physique semble obtenir des effets bénéfiques sur l'engagement et le maintien de l'activité physique (279). Les moyens d'action de la ludification sont de faire progresser le joueur en gagnant des points,

[12] À ne pas confondre avec « ludicisation », terme utilisé dans des contextes d'apprentissage.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

d'intégrer un mécanisme de rétroaction (ou boucle d'engagement), d'encourager les échanges entre joueurs, et de permettre la personnalisation du service (278).

Tous ces moyens reposent sur les principes issus de la théorie de l'auto-détermination décrite par Deci et Ryan en 2008 (280). Selon cette théorie, la motivation se présenterait sous forme de continuum dépendant du niveau d'autodétermination de chacun, allant de la motivation intrinsèque à l'amotivation en passant par la motivation extrinsèque (figure 16).

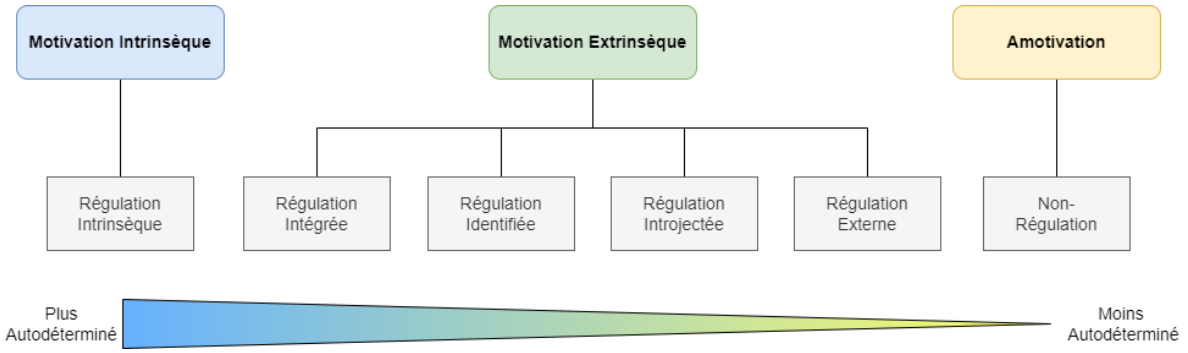


Figure 16 : Continuum de l'autodétermination selon Deci et Ryan (280)

La motivation intrinsèque correspond au fait de réaliser une action pour le plaisir, l'intérêt ou les satisfactions qu'elle procure ; c'est la motivation la plus autodéterminée. Selon la théorie de l'évaluation cognitive (281), il existe trois besoins indispensables afin de pouvoir éprouver des formes de motivation intrinsèque, qui sont l'autonomie, la compétence et la relation. L'autonomie est la liberté des personnes à s'engager dans une activité sans pression externe ni influence d'autrui. Un sentiment fort d'autonomie est perçu lorsqu'un large choix est offert en termes d'activité, de personnalisation et d'évolution. Plus le sentiment d'autonomie est fort plus la motivation intrinsèque est élevée. La compétence correspond au besoin de se sentir performant lors de la réalisation d'activités. Il s'agit par exemple pour les personnes de savoir réaliser correctement un exercice tout en obtenant les résultats et bénéfices escomptés. Il a été constaté que la satisfaction de ce sentiment de compétence favorisait l'adhésion aux programmes d'exercices notamment par le biais d'émotions positives perçues. Enfin, la relation comprend toute interaction sociale, échange avec autrui et collaboration, qui favorisent la construction de liens sociaux tout en renforçant le désir de performer et de s'appliquer durant l'exercice.

À l'inverse, la motivation extrinsèque est ce qui nous pousse à réaliser une action pour obtenir un résultat ou éviter une conséquence néfaste, et non pour le plaisir perçu (282). Elle se décompose en quatre régulations comportementales distinctes selon le modèle du continuum d'autodétermination (280). La régulation externe correspond à la pression environnante, comme pratiquer une activité physique afin d'éviter les réflexions de proches. La régulation introjectée correspond à la pression interne exercée par l'individu lui-même, comme pratiquer une activité physique par culpabilité ou normes sociales. La régulation identifiée est le fait de valoriser une activité pour les bénéfices qu'elle procure, comme pratiquer une activité physique pour se vider la tête. Enfin, la régulation intégrée est très proche de la motivation intrinsèque, à la différence que la motivation est pour le bénéfice et non pour le plaisir.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Enfin, l'amotivation est l'absence de compréhension de la part de l'individu du lien entre la pratique d'une activité et les conséquences sur lui ou sur son environnement. Cette incompréhension ne pousse pas la personne à l'activité.

3.3.2. La malléabilité des *exergames*

En plus de leur efficacité et de leur attractivité, les *exergames* présentent une grande flexibilité tant sur la forme que sur le fond, illustré en figures 12 et 13. Ainsi, ils sont modulables et adaptables, ce qui permet de les proposer à domicile ou en structures, encadrés ou non par des animateurs, et d'être pratiqués individuellement ou collectivement. Mais cette adaptabilité permet surtout de développer des *exergames* sur mesure répondant aux besoins spécifiques d'une population. Les nombreuses recommandations dans la conception, le design et l'utilisation des jeux en santé précisent que l'efficacité des systèmes proposés dépend de cette spécificité (283,284). La malléabilité des *exergames* permet de construire un programme d'entraînement en DT le plus adapté possible aux besoins. Ce programme d'entraînement peut répondre aux recommandations issues de la littérature traitant des déterminants de l'efficacité des entrainements (cognitifs, moteurs ou en DT). Ce programme d'entraînement peut également répondre aux recommandations concernant les *exergames* utilisé comme support d'entraînement des fonctions cognitives, motrices ou en DT en lien avec le risque de chute et la perte d'autonomie chez des sujets âgés. Enfin, ce programme d'entraînement peut répondre aux principes issus de ludification afin d'encourager l'adhérence des sujets âgés.

La malléabilité des *exergames* permet de surcroit une ludification des exercices avec une forme adaptée elle aussi au public cible. Effectivement, un support ludique pour de jeunes enfants ne sera pas le même que pour des séniors. En ce sens, nous nous sommes reposés sur la théorie de la réminiscence (285). Cette théorie utilisée chez des patients déments et pré-déments repose sur la présentation de photographie ou de musiques anciennes permettant d'évoquer des mémoires et des expériences passées, et ainsi stimuler les conversations. Ainsi, l'utilisation comme support de jeu d'un patrimoine local largement connu par les utilisateurs, et évocateur de souvenirs, permettrait encore d'encourager leur engagement dans ce jeu par le lien social.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé de la Partie 3

Les *exergames* sont un type particulier d'entraînement en DT utilisant comme support un jeu vidéo. Largement modulables, ils se présentent sous de nombreuses formes, destinés à différents publics, utilisés de façon sérieuse ou ludique.

Les *exergames* seraient efficaces pour l'entraînement des capacités cognitives des séniors sains. Leurs effets sur les capacités motrices et de DT sont plus débattus ou peu clairs, tout comme leur effet sur l'encouragement à la pratique d'une activité physique. Toutefois, les *exergames* seraient efficaces dans la lutte contre la dépression et le maintien de la qualité de vie. Ils permettraient en outre une augmentation de l'engagement des séniors dans leur programme d'entraînement. De plus, leur flexibilité de forme et de fond permet de s'adapter aux besoins spécifiques du public cible.

Les *exergames* sont donc potentiellement pertinents pour l'entraînement des séniors en DT dans un contexte de prévention des chutes et de maintien de l'autonomie et de la qualité de vie. Leur niveau de sollicitation tant cognitive que motrice est variable et relativement peu étudié.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

4. Problématique

Le vieillissement est une progression inéluctable altérant l'ensemble des systèmes constituant le corps humain. Ainsi le cerveau vieillissant communique moins efficacement, se régénère moins et présente des anomalies de dysfonctionnement. Ceci entraîne une diminution des capacités cognitives globales, et plus particulièrement de l'aptitude à traiter l'information via les fonctions exécutives. Dans le même temps, le complexe muscle-tendon devient moins capable de produire de la force, tandis que le contrôle postural se dégrade. Ceci entraîne une baisse de la force musculaire, de la mobilité et de l'équilibre. Ces dégradations cognitives et motrices, additionnées à une perte d'automatisation des tâches motrices simples, entraînent une augmentation de l'ICM chez les personnes âgées qui sont alors moins aptes à réaliser deux tâches simultanément. Toutes ces dégradations représentent autant de facteurs de risque de chute et de possibles limitations de l'autonomie dans les activités quotidiennes, menant à une éventuelle réduction de la qualité de vie des séniors. De nombreux travaux de recherche ont été menés afin de contrer ces déclins, ou a minima les freiner. Il a ainsi été observé que les entraînements cognitifs étaient bénéfiques pour la cognition des séniors, mais aussi pour certains aspects moteurs. En parallèle, les entraînements moteurs ont montré leur efficacité sur la motricité des séniors, mais également sur certains aspects cognitifs. Le lien entre cognition et motricité, couplé à la dégradation des capacités des séniors en DT, a logiquement amené les recherches sur la piste des entraînements en DT. Ceux-ci semblent pertinents à la fois pour l'entraînement de la cognition et de la motricité chez les séniors, mais également pour leurs capacités de DT et *in fine* de certains composants de la qualité de vie. La limite principale à ce type d'intervention est inhérente à la majorité des entraînements. Nous rencontrons effectivement des difficultés pour motiver les séniors à s'engager, réaliser correctement et jusqu'au terme des programmes d'entraînement dits classiques. Ceci peut être contré en se servant de la ludicité intrinsèque des jeux. Les *exergames* sont des jeux vidéo nécessitant une activité physique pour être pratiqués et contenant une activité cognitive intrinsèque. En ce sens, ils représentent un type d'entraînement en DT ludifié. Malléables tant sur le fond que sur la forme, ils peuvent être adaptés à une utilisation par des séniors en ciblant les fonctions cognitives et motrices clefs dans la perte d'autonomie liée au vieillissement tout en leur étant accessibles. L'étude de l'efficacité des *exergames* chez les séniors nous indique qu'ils remportent une bonne adhérence et sont pertinents pour l'entraînement des fonctions cognitives (mais plus discutés sur le plan moteur). Des inconnues demeurent, telles que leur impact sur les capacités de DT, sur la qualité de vie ou sur le niveau d'activité physique des séniors ainsi que la persistance de ces bénéfices dans le temps. Enfin, nous ne connaissons pas le niveau d'intensité des différents *exergames*, facteur direct de leur efficacité.

Par cette étude pilote, nous cherchons à savoir si un *exergame* « sur mesure » serait efficace à court et moyen terme pour l'amélioration des fonctions cognitives, motrices et de DT chez des personnes âgées. Nous explorons également les effets de ce jeu sur le niveau d'activité physique, de peur de tomber et la qualité de vie des participants, ainsi que le niveau de sécurité et d'adhérence de ce jeu. Enfin, nous explorons le niveau de sollicitation physique de ce jeu.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Recherche et développement

Licence CC BY-NC-ND 3.0

5. Conceptualisation et développement de l'*exergame*

Avant de pouvoir évaluer le niveau d'intensité, d'efficacité, de sureté ou d'attractivité de notre programme d'entraînement en DT reposant sur un *exergame*, nous avons dû développer cet *exergame*. La première étape consistait en son imagination, puis à sa traduction en outil utilisable.

Dans cette partie, nous aborderons les recommandations issues de la littérature pour la construction d'un *exergame*, tant sur la forme que sur le fond. Puis nous détaillerons comment, en appliquant ces recommandations, nous avons conçu et développé notre *exergame*. Nous détaillerons alors son mode de fonctionnement et les modalités de jeu.

5.1. Recommandations pour la construction *d'exergames*

La flexibilité des *exergames* est un atout permettant de construire un programme d'entraînement en DT le plus adapté possible aux besoins tout en étant attrayant. Nous explorons ici les recommandations issues de différentes littératures. Nous joignons ainsi des études traitant des déterminants de l'efficacité des entrainements cognitifs, moteurs ou en DT, mais aussi des interventions basées sur des *exergames*, sur les fonctions cognitives, motrices ou en DT en lien avec le risque de chute et la perte d'autonomie chez des sujets âgés. Nous apportons également des arguments issus de la théorie de ludification et de l'auto-détermination. L'objectif est de dessiner les recommandations tant sur la forme que sur le fond pour la construction d'*exergames*, qui se situent au croisement de tous ces champs d'entraînement et de jeu.

5.1.1. Recommandations sur le fond

Débutons par le fond de l'*exergame*, c'est-à-dire le programme d'entraînement en DT sous-jacent. Sur le plan moteur, les travaux de l'*American College of Sports Medicine* nous orientent sur la dose d'activité physique recommandée chez les séniors concernant l'intensité, la durée, la fréquence et la nature des exercices (286). Ces recommandations incluent la pratique d'une activité physique aérobie d'intensité modérée de 30 minutes cinq jours par semaine ou intense 20 minutes trois jours par semaine ; ces modalités pouvant être combinées. De plus, les séniors devraient réaliser deux fois par semaine des exercices de renforcement musculaire (entraînements en force et en endurance), ainsi que des exercices de flexibilité (étirements, postures). Enfin, en plus de conseils en termes de nutrition et de sédentarité, ces recommandations incluent la pratique d'entraînement de contrôle postural pour prévenir les chutes. En continuité, Sherrington et al. ont dressé en 2017 les recommandations pour la prévention des chutes chez les séniors (287). Cette revue systématique avec méta-analyse regroupant près de 20 000 participants au sein de 88 études nous apprend sans surprise que les programmes incluant des exercices mettant l'équilibre postural à l'épreuve sont les plus efficaces.

La vaste littérature traitant des entraînements en DT et des *exergames* a permis de dégager des recommandations sur le contenu des programmes. Ainsi, les tâches motrices doivent regrouper des exercices de force, d'équilibre et de *stepper*, conventionnels pour la prévention de la chute (228,229,288). Les tâches cognitives doivent être des exercices de fluence verbale, d'inhibition, de flexibilité, de mémoire de travail dont visuospatiale, de vitesse de réaction et

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de traitement (43,201,289). De plus, il est préférable que les programmes contiennent des DT simultanées plutôt que séquentielles (174), fonctionnelles plutôt que spécifiques (182,290), complexes (182,289) de difficulté croissante (182), avec une tâche prioritaire variable (181,182). La dose optimale d'exposition est difficile à définir : il n'y aurait pas d'impact de la durée, de la longueur ou de l'intensité du programme sur le niveau d'efficacité selon deux récentes méta-analyses (200,201). Une corrélation négative a même été montrée entre la longueur et les effets chez des sujets âgés non sains (291). Ceci peut être dû à la fatigue cognitive (292) ou au stress (293) qu'entraîne la combinaison des deux tâches. Temprado proposait en 2021 une approche similaire pour l'amélioration des *exergames* proposés auprès de séniors (294), regroupant la nécessité d'une tâche simple à difficulté croissante, d'inclusion de manipulation d'information au sein des exercices, de modification des consignes et des contraintes au fil du jeu avec des conditions de jeu qui varient, et d'un retour d'information fournie aux joueurs.

5.1.2. Recommandations sur la forme

Les premières recommandations concernant la forme de l'*exergame* sont générales à la ludification : créer un jeu collaboratif afin d'encourager les échanges entre les joueurs sans discriminer ou exclure les moins performants, et proposer une progression via un système de points au sein d'une session de jeu, mais également au fil du temps (278). Il est de plus important que l'*exergame* soit adapté à l'utilisation par des séniors, donc prenant en compte leurs potentiels déficits. Ainsi, les menus et les contrôles doivent être simples, les polices d'écriture large, et les animations lentes (295). Enfin, il est conseillé d'intégrer un retour (ou *feedback*) oral et visuel à la fin de chaque séance (182,289), encourageant les boucles d'engagement (278).

Nous avons aussi retenu des arguments permettant de lutter contre différentes barrières à la pratique d'activité physique (272,273). Sur le plan intrapersonnel par exemple, si le passage par le jeu permet de renforcer la motivation, la présence d'un emploi du temps collectif, fixe et construit selon les impératifs de chacun permet de contrer le « manque de temps ». La notion de fatigue est endiguable en proposant une activité physique adaptée en quantité et en qualité, respectant des temps de repos au sein et entre les séances. De plus, la présence systématique d'un animateur doit permettre une réduction de la peur durant la pratique. Sur le plan interpersonnel, une activité proposée en groupe s'oppose à la solitude dans la pratique, et l'affect pour l'animateur vient renforcer l'adhésion et la volonté de faire. Enfin, les contraintes temporelles ou spatiales propres au domaine communautaire sont court-circuitées par une activité proposée directement sur le lieu de vie.

Ainsi, un *exergame* dont l'objectif est le maintien des capacités cognitives et motrices de séniors dans un contexte de prévention des chutes et de maintien de l'autonomie, et pour lequel nous souhaiterions obtenir la meilleure adhérence possible serait un jeu collectif collaboratif de difficulté croissante au sein et au fil des séances, aux contrôles, règles et affichages simples, avec des retours audio-visuels fréquents voire continus. Ce jeu serait systématiquement encadré par un animateur, réalisé sur le lieu de vie selon un emploi du temps fixe. Il serait le support d'une activité d'entraînement en DT regroupant des exercices fonctionnels d'équilibre postural, de force et de *stepper* réalisés en simultané avec des

Licence CC BY-NC-ND 3.0

exercices de fluence verbale, d'inhibition, de flexibilité, de mémoire de travail, de vitesse de réaction et de traitement.

5.2. Conceptualisation et développement de l'*exergame*

À partir de cette synthèse, nous avons conçu un jeu vidéo répondant à ce cahier des charges. Notre jeu vidéo est composé d'un aspect matériel (ou *hardware*) et d'un aspect logiciel (ou *software*).

Nous ne sommes pas partis d'une feuille vierge d'un point de vue matériel, nous reposant sur une technologie éprouvée préalablement développée par l'unité de recherche HAVAE (Handicap, Activité, Vieillissement, Autonomie, Environnement). Cette solution, appelée le « Tapis Virtuel », est une association entre une scène vidéoprojetée au sol et un système de suivi des mouvements à l'aide du dispositif HTC® Vive (voir figure 17). Ce dispositif a fait l'objet d'un certain nombre de publications, permettant notamment l'étude des capacités de mémoire visuospatiale des participants (296–298).

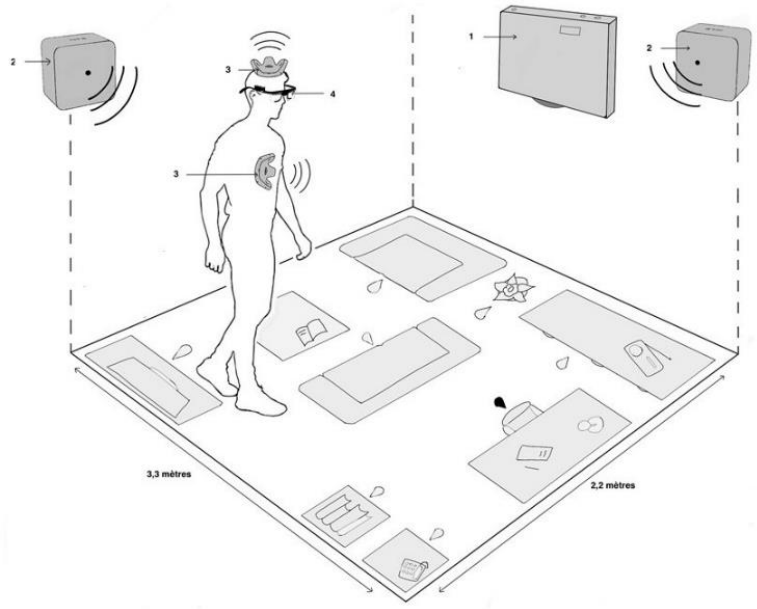


Figure 17 : Le « Tapis Virtuel », constitué de l'association entre un vidéoprojecteur (1), ainsi que les caméras (2) et traqueurs (3) HTC Vive ® - illustration issue d'une publication (299)

Le « Tapis Virtuel » dans sa conception initiale proposait un affichage fixe d'une scène unique sur une aire de 4 mètres sur 3 mètres directement au sol, les traqueurs de l'HTC® Vive ne servant qu'à relever des données expérimentales de position, de vitesse et d'accélération. Or, le jeu vidéo que nous avons conçu reposait sur un ensemble de mini-jeux permettant de varier les types d'activités proposées aux participants. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de différents jeux de plateau classiques tels que le jeu de l'oie ou des petits chevaux, mais aussi des plus modernes tels que Mario® Party. Notre idée sous-jacente était que le port d'un capteur HTC® Vive par participant permettrait de l'identifier en tant que joueur dans l'univers virtuel, de projeter sa position dans l'aire au sol via son avatar, mais surtout de déclencher les changements de scène affichée suivant sa position sur le plateau de jeu. Ainsi, lorsqu'un

Licence CC BY-NC-ND 3.0

joueur se déplace sur une case du plateau de jeu au sol, l'ordinateur déclenche un mini-jeu, puis nous revenons au plateau de jeu, et ainsi de suite. Le « Tapis Virtuel » permet alors un haut niveau d'interaction des joueurs avec l'aire vidéoprojetée au sol grâce au suivi continu de leur position.

La traduction de cette idée de jeu en lignes de code a demandé des compétences en ingénierie informatique. Pour l'aspect logiciel, le développement est le fruit d'un partenariat avec l'école d'ingénieurs 3iL (Institut d'ingénierie informatique de Limoges). Nous avons défini un cahier des charges du livrable que nous souhaitions obtenir, et avons répondu à un appel à projets au sein de cette école. Il fallait que le jeu soit collaboratif, qu'il ne soit pas pénalisant ni stigmatisant, qu'il soit lisible, visible, clair, que les consignes soient simples et compréhensibles. Il fallait également qu'il soit sûr et ne mette pas en danger les participants, tout en présentant une difficulté modulable afin d'être à la fois sollicitant et réalisable. Il devait être suffisamment facile à prendre en main pour être utilisé par tout un chacun, et encadré par des animateurs. Enfin, nous étions soumis aux limitations techniques et pratiques inhérentes à la technologie du « Tapis Virtuel ». Ainsi, il fallait concevoir les mini-jeux en prenant en compte la gestion de l'ombre portée du vidéoprojecteur et l'obstruction des capteurs infrarouges des caméras de l'HTC Vive®.

Les changements d'interface suivant la position des joueurs dans l'aire de jeu sont permis par la superposition de deux logiciels : Steam® VR qui permet l'utilisation de l'HTC® Vive et la reconnaissance des traqueurs portés par les joueurs dans l'espace réel par les caméras infrarouges, ainsi que Unity® qui permet de transposer ces traqueurs dans un univers virtuel et graphique, afin de projeter cet univers au sol comme aire de jeu (figure 18). Ce sont cette surcouche logicielle, cette interface utilisateur et la logique algorithmique en arrière-plan qui ont été développées par 3iL, en traduisant le concept en code.

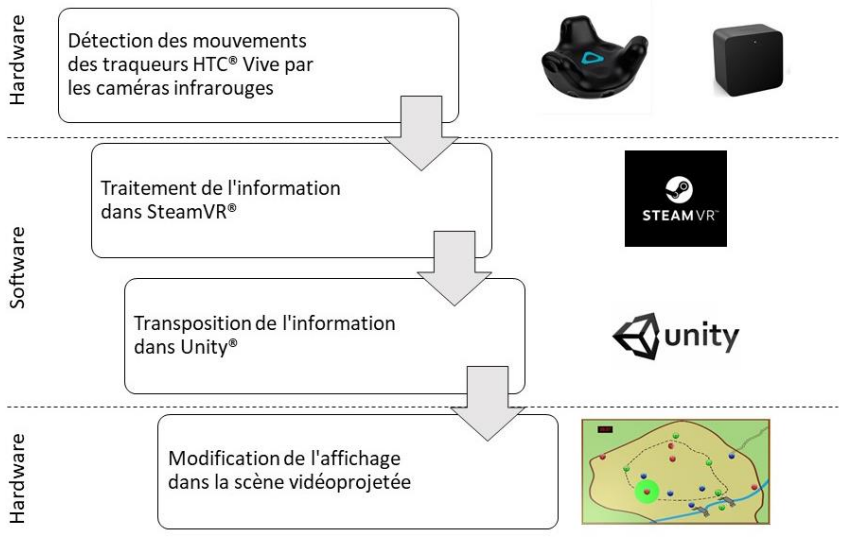


Figure 18 : Fonctionnement de l'interaction entre les participants et l'*exergame*

La logique algorithmique est la suivante : les changements de scènes sont déclenchés par la collision entre la position estimée du joueur (donnée par le traqueur HTC® Vive dans

Licence CC BY-NC-ND 3.0

l'environnement réel), et la position connue du point d'intérêt (dans l'application). La détection de telles collisions nécessite une projection de la position réelle du joueur dans l'application, car les systèmes de coordonnées sont différents. En d'autres termes, un point $p = (x_w,y_w)$ doit être projeté sur une position $q = (x_g,y_g)$ dans l'aire de jeu. Ceci est permis par la formule

$$q = Hp$$

où H est la matrice d'homographie entre le monde réel et la scène de jeu, obtenue par la calibration du jeu lors de son installation. Ce calibrage repose sur un outil développé spécialement, demandant de « confirmer » le lien entre le repère orthonormé réel en trois dimensions $(\vec{\imath}, \vec{\jmath}, \vec{k})$ et celui projeté en deux dimensions $(\vec{\imath'}, \vec{\jmath'})$ en définissant 4 points au sol à l'aide d'un capteur afin de fournir un plan de référence commun (figure 19). L'animateur doit poser un capteur au sol dans la cible projetée, cibles après cibles, confirmant le lien entre sa position dans le réel et celle dans la projection.

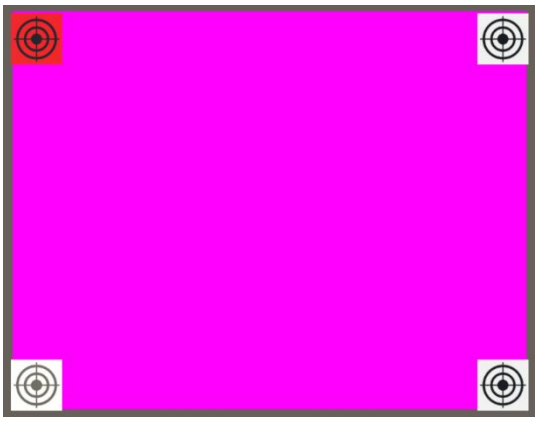


Figure 19 : Calibrage de l'*exergame*

Enfin, la position des joueurs dans l'espace réel et leur projection dans l'espace virtuel sont estimées par les traqueurs HTC® Vive avec une grande précision (300). Toutefois, ce dispositif infrarouge s'accompagne d'un bruit de signal. Nous avons développé et ajouté un élément logiciel (un filtre passe-bas) afin d'améliorer l'expérience des joueurs. Le guide complet d'installation de notre dispositif est disponible en ligne[13].

Le dispositif final de notre jeu est illustré en figure 20. Dans cette illustration, seuls 2 participants sur 4 sont représentés afin de maximiser la lisibilité du dispositif.

[13] Le lien direct vers notre guide d'installation est https://drive.google.com/file/d/1VqgfzsNx9sFEBjQXsRrGBbDK8lKciFvy/view?usp=sharing

Licence CC BY-NC-ND 3.0

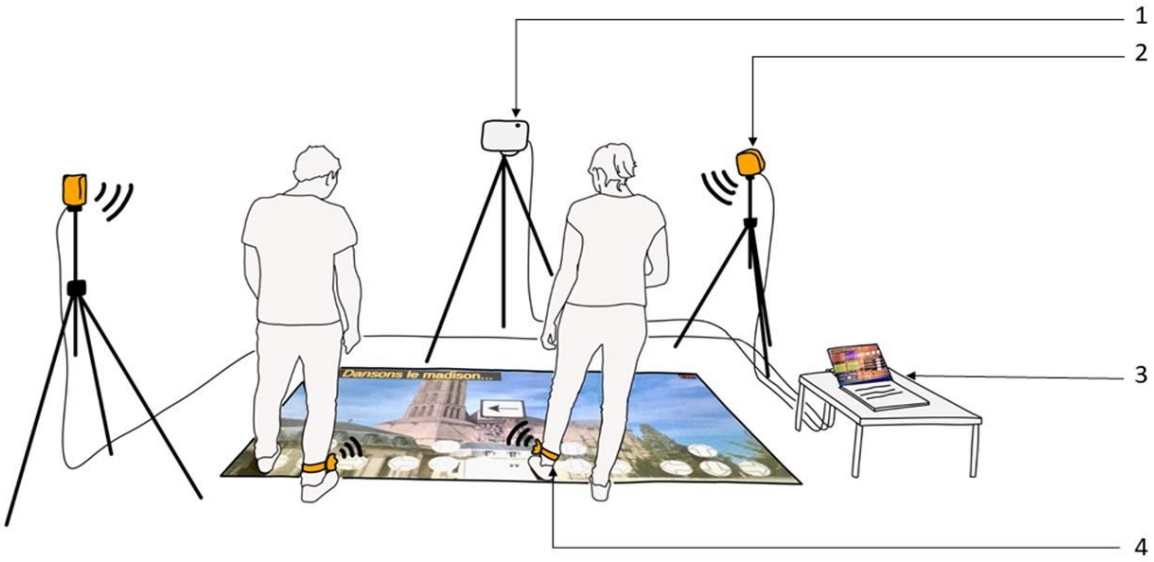


Figure 20 : Dispositif de l'*exergame* en utilisation réelle - illustration issue d'une publication (299)

1) Rétroprojecteur, 2) Caméra infra-rouge HTC® Vive, 3) Unité centrale, 4) Traqueur HTC® Vive.

5.3. Fonctionnement et règles de l'*exergame*

Passons maintenant au fonctionnement de notre *exergame* et à ses règles que nous avons construit autour des recommandations issues de nos lectures. Le but du jeu est pour les joueurs d'explorer des lieux emblématiques de la ville de Limoges (ou points d'intérêt), ce qui déclenche des mini-jeux d'une durée moyenne de 3 minutes nécessitant la réalisation d'exercices en DT. Chaque session de jeu dure 30 minutes et réunit 4 participants qui jouent collectivement dans le but d'obtenir le score le plus élevé possible. Les points sont attribués à la fin de chaque mini-jeu par l'animateur comme suit : la présence du joueur vaut 1, sa participation 2, et sa bonne réalisation 3. Le score global d'une session de jeu correspond au cumul des scores des 4 participants à l'ensemble des mini-jeux. Les groupes de 4 étant fixes, les participants peuvent suivre l'évolution de leurs scores individuels et de groupes au cours des semaines. Le guide complet des consignes et des règles du jeu est disponible en ligne[14].

5.3.1. Interfaces de jeu

L'interface du jeu est scindée en deux, avec un écran pour l'animateur et un autre pour les joueurs. Ces deux écrans communiquent et sont liés dans leur mode de fonctionnement, mais sont indépendants dans leur contrôle.

L'aire de jeu correspond à une vue schématique de la ville de Limoges incluant 15 points d'intérêt (parcs, bâtiments, évènements ou lieux de vie). Les joueurs sont associés à une couleur (rouge, jaune, vert ou bleu) déterminée par le capteur qu'ils portent à la cheville.

[14] Le lien direct vers notre fascicule comprenant les consignes de jeu est https://drive.google.com/file/d/1AC6ajWNarQaoVr0cXbV-dGWtVKzXUxv5/view?usp=sharing

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chacun leur tour, les points d'intérêt sont tirés au sort et cerclés d'une des couleurs correspondant à un participant (figure 21, partie 1). C'est alors au joueur de la couleur correspondante d'aller marcher sur ce point d'intérêt cerclé et d'y rester 3 secondes – ceci est matérialisé par un décompte visible (figure 21, partie 2). La scène change alors pour l'interface de mini-jeu correspondante (figure 21, partie 3). Une fois les 3 minutes de mini-jeu complétées, l'aire de jeu redevient la vue schématique de la ville (figure 21, partie 1), où un nouveau point d'intérêt est choisi et se cercle d'une nouvelle couleur correspondant à un autre joueur. Le code du jeu permet la reconnaissance de la position des capteurs dans l'espace, mais aussi le tirage au sort sans remise des points d'intérêt et des joueurs appelés. Il est important de noter que si les participants jouent un rôle successivement pour le lancement des mini-jeux, la réalisation de ceux-ci est collective et concerne systématiquement les 4 participants.

L'écran dédié à l'animateur est un panneau de commandes permettant le contrôle et la supervision du jeu : mettre en pause la session de jeu, relancer un mini-jeu, régler la difficulté comme la vitesse d'affichage des cibles, et gérer les points (figure 21, partie 4).

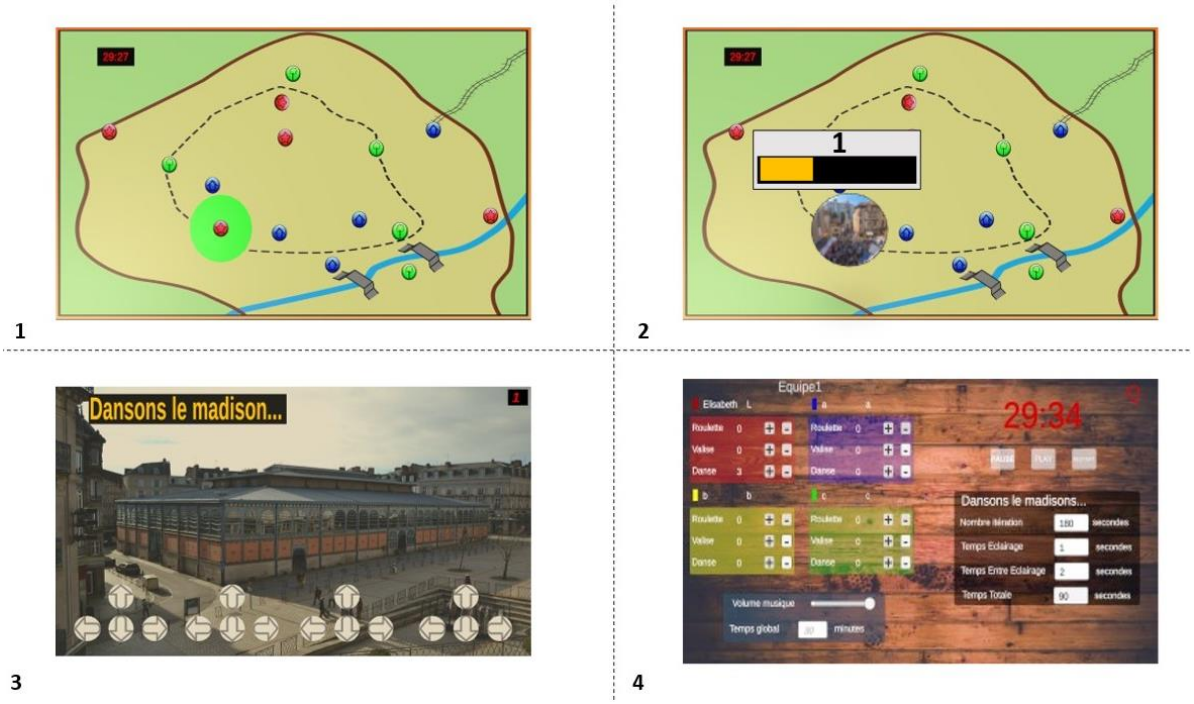


Figure 21 : Les différentes interfaces de l'*exergame* disposées au sol pour les joueurs (1-3) ou sur l'écran de l'animateur (4)

1) La ville de Limoges et ses 15 points d'intérêt, dont l'un est cerclé de vert, 2) Le chargement d'un mini-jeu lorsque le joueur vert vient se positionner sur le point d'intérêt cerclé de vert, 3) L'interface du mini-jeu correspondant, 4) Le panneau de contrôle de l'animateur, permettant de donner les points et de régler les paramètres du mini-jeu.

Ce choix de mise en avant de la ville de Limoges et de son patrimoine culturel repose sur la théorie de la réminiscence (285) pour renforcer l'engagement, ainsi qu'une volonté d'encourager les participants à explorer la ville et donc d'augmenter leur niveau d'activité physique.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

5.3.2. Exercices proposés

Les exercices en DT proposés durant les mini-jeux constituant notre *exergame* sont de trois types : exercices de passage de pas (ou *stepping*), de mémoire visuospatiale et de réflexes (tableau 2). Ils correspondent aux trois types de points d'intérêt représentés sur la carte : bâtiments, parcs et jardins, ou évènements et lieux de vie. Ces exercices en DT sont constitués systématiquement d'une tâche motrice et d'une tâche cognitive qui sont réalisées simultanément et de façon incorporée (modèle du « *moving while thinking* »). Les tâches motrices consistent en des exercices de *stepping*, d'équilibre ou de force. Les exercices de *stepping* sont des exercices de passage du pas en rythme avec ou sans marchepied. Les exercices d'équilibre consistent en un travail du contrôle postural réalisé en appui uni ou bipodal, avec un déplacement du centre de pression avec ou sans déstabilisation extrinsèque ou intrinsèque. Les exercices de renforcement visent les membres inférieurs et le tronc, sont fonctionnels et en endurance avec ou sans équipement (poids, élastiques). Les tâches cognitives sont des exercices de fluence verbale, d'arithmétique, d'inhibition et de flexibilité mentale, de mémoire de travail et de vitesse de traitement. Les exercices de fluence verbale peuvent être des énumérations d'éléments à partir d'une consigne (première lettre du mot, régions de France, etc.). Les exercices d'arithmétique sont des calculs mentaux : addition, soustraction, multiplication, division. Les exercices d'inhibition et de flexibilité mentale nécessitent de réaliser ou stopper une action lors d'un signal visuel ou sonore (principe du « *go* / *no*-go »). La mémoire visuospatiale est travaillée par une phase d'apprentissage suivie d'une phase de restitution de trajets présentés via l'aire au sol. Enfin, les exercices de vitesse de traitement consistent en la réalisation ou l'arrêt d'une action le plus rapidement possible. Nous détaillons les trois types d'exercice ainsi que la combinaison de ces tâches cognitives et motrices dans le tableau 2. La difficulté des exercices s'ajuste soit par le panneau de contrôle de l'animateur permettant de régler la vitesse d'affichage et de disparition des flèches lors de l'activité de *stepping* par exemple, soit par la complexité des consignes données à l'oral, soit par l'utilisation de matériel (poids, élastiques, ballons, marche pieds, etc.).

Activité	**Description et illustration**
Stepper	Des flèches directionnelles s'affichent successivement au sol, et les participants doivent les reproduire en rythme. Les variations sur le plan moteur sont d'utiliser un pied, deux pieds, de réaliser un squat, une fente, des exercices simultanés des membres supérieurs, etc. Les tâches cognitives concomitantes sont de ne pas reproduire une flèche spécifique, de les inverser, ou de les restituer avec un temps de retard.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Mémoire visuospatiale	Des éléments affichés au sol vont s'allumer puis s'éteindre à fréquence fixe, constituant une série qui s'allonge de plus en plus. Les participants doivent mémoriser cette séquence puis la restituer en se déplaçant. Ils réalisent durant la phase d'acquisition des exercices moteurs (montée de genoux, talons fesses, squats, fentes, passage de balle, travail de l'équilibre, dissociation des ceintures, etc.). Ils réalisent également des exercices moteurs durant la restitution lors de leurs déplacements dans l'aire de jeu. Les tâches cognitives concomitantes sont de ne pas considérer l'une des icônes, d'ignorer l'un des éléments dans la liste, de restituer la séquence en marche arrière, ou en partant de la fin.
Réflexes	Les participants doivent réaliser des exercices de renforcement musculaires (montée de genoux, talons fesses, squats, fentes, passage de balle, travail de l'équilibre, dissociation des ceintures, etc.). Ils doivent dans le même temps réaliser une tâche qui peut être arithmétique (résoudre des calculs mentaux qui apparaissent au sol), verbale (réaliser un jeu du « petit bac »), ou bien visuelle en alternant les exercices réalisés suivant la forme affichée au sol.

Tableau 2 : Description et illustration des 3 types d'exercices proposés dans notre *exergame*

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé de la Partie 5

Nous avons conçu et développé un *exergame* répondant aux recommandations issues de la littérature pour l'entraînement des fonctions cognitives, motrices et de DT des séniors dans un contexte de prévention des chutes et de maintien de l'autonomie. La conceptualisation de ce jeu nous a demandé de parcourir également une littérature traitant du renforcement de l'adhérence, passant notamment par la théorie de l'autodétermination et la ludification. Nous avons adapté ce jeu tant sur le fond que sur la forme afin qu'il corresponde aux besoins et aux attentes des séniors pour en renforcer l'efficacité et l'attractivité. Il s'agit d'un jeu collectif collaboratif encadré par un animateur, de difficulté croissante au sein et au fil des séances, aux contrôles, règles et affichages simples, avec des retours audio-visuels fréquents voire continus.

Nous proposons une illustration concrète de ce jeu par le biais d'une vidéo réalisée par le service média de la municipalité de Limoges accessible via le QR code[15] présenté en figure 22.

Figure 22 : QR code renvoyant vers une vidéo de présentation du dispositif de jeu

[15] Le lien direct vers cette vidéo est https://www.youtube.com/watch?v=Wiaq4-_Fj7w

Licence CC BY-NC-ND 3.0

6. Pré-étude transversale : Comparaison de l'intensité physique des séances lors de sessions d'entraînement en ST, en DT et via l'*exergame* chez des sujets jeunes et sains

Dans cette partie, nous détaillons pourquoi, comment et auprès de qui avons-nous évalué l'intensité physique qu'induisait une séance d'entraînement réalisée via notre *exergame*. Nous détaillons les résultats de cette étude, ainsi que les pistes explicatives desdits résultats.

Cette pré-étude transversale fait l'objet d'une publication en cours (316) dont le preprint est présenté en annexe 2.

Article 2 : Gallou-Guyot M., Perrochon, A., Marie, R., Bourgeois, M., Mandigout S. (2022). Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study (Preprint). JMIR Preprints.

6.1. Objectifs

L'efficacité des *exergames* dépend en partie de leur niveau de sollicitation tant physique que cognitive des participants. Dans cette pré-étude transversale, nous avons évalué l'intensité physique que pouvait induire notre *exergame* et l'avons comparée à des méthodes d'entraînement plus conventionnelles nous servant de référence.

6.1.1. Objectif principal

L'objectif principal était de comparer l'intensité de l'effort mesurée indirectement à l'aide de la fréquence cardiaque (FC) entre des séances d'entraînement utilisant l'*exergame*, des séances d'entraînement en DT et des séances d'entraînement en ST.

6.1.2. Objectif secondaire

L'objectif secondaire était de comparer l'intensité de l'effort perçue mesurée à l'aide de l'échelle de Borg entre les trois types de séances d'entraînement.

6.2. Méthode

Dans cette première partie, nous détaillons le *modus operandi* de cette étude, des participants à la procédure expérimentale et statistique.

6.2.1. Participants

Pour mener cette étude, nous avons recruté des sujets jeunes et sains étudiants à l'université de Limoges. Les critères d'inclusion étaient d'être âgé de 18 à 35 ans et de parler français. Les critères de non-inclusion étaient de présenter une contre-indication à la pratique d'activité physique, ou d'avoir mangé ou bu durant les 2 heures précédant l'étude. Les critères d'exclusion était l'apparition d'une blessure, d'une douleur significative ou d'une FC supérieure à 90% de la FC maximale théorique (301). Les volontaires ont reçu une note d'information

Licence CC BY-NC-ND 3.0

détaillant le protocole, et la récolte des données a été réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki révisée de 2013.

6.2.2. Procédure

Les participants ont réalisé 3 types de séances d'entraînement : *exergame* (EG), entraînement en doubles tâches cognitivo-motrice (DT) et entraînement en simple tâche motrice (ST). Les séances d'entraînement étaient conçues à l'identique : des exercices physiques (ST), avec une tâche cognitive concomitante (DT), utilisant notre *exergame* comme support (EG). Les séances étaient réalisées par groupe de 4 participants, et l'ordre des séances était randomisé pour chaque groupe. Les séances duraient 30 minutes et étaient séparées au minimum de 24 heures. Les séances étaient subdivisées en 8 exercices de 3 minutes (voir le détail des exercices en tableau 3), avec 30 secondes de repos entre chaque exercice – l'activité physique effective était donc approximativement de 24 minutes à chaque séance.

EG	*Stepper (avec ou sans marche pied)*	*Mémoire visuospatiale et équilibre*	*Force musculaire et coordination motrice*
	Des flèches sont présentées successivement dans l'aire vidéoprojetée au sol, que les participants doivent reproduire sur leurs *pads* respectifs avec un pied, deux pieds, en faisant un squat, une fente, etc. La tâche cognitive concomitante consiste en ne pas reproduire une flèche ("*go / no go"*), de les inverser (flexibilité mentale), ou de les restituer avec un délai (mémoire de travail).	Huit éléments présentés dans l'aire vidéoprojetée au sol vont s'allumer et s'éteindre successivement à une fréquence fixe, constituant un empan croissant. Les participants doivent mémoriser cette séquence puis la restituer en se déplaçant sur l'aire de jeu. Dans le même temps, ils doivent réaliser des exercices physiques (montées de genoux, talons/fesses, squat, fente, *jumping jacks*). La tâche cognitive concomitante consiste en ne pas considérer l'une des icônes, ou de restituer l'empan à partir de la fin.	Les participants doivent réaliser des exercices de renforcement musculaire, comme des squats ou des fentes. Dans le même temps, ils doivent : 1) résoudre des exercices d'arithmétique apparaissant sur l'aire de jeu, ou 2) alterner entre des exercices moteurs suivant l'image apparaissant dans l'aire de jeu.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

DT	*Stepper (avec ou sans marche pied)*	*Mémoire visuospatiale et équilibre*	*Force musculaire et coordination motrice*
	L'animateur montre une séquence de mouvements que les participants doivent tous reproduire en miroir (*stepper*, squat, fente, etc.). La tâche cognitive concomitante consiste en ne pas reproduire un mouvement ("*go / no go"*), d'inverser les mouvements (flexibilité mentale) ou de les restituer avec un délai (mémoire de travail).	Les participants doivent disposer un total de 8 plots au sol, chacun leur tour. L'ordre de placement des plots constitue l'empan. Les participants doivent mémoriser cette séquence, puis la restituer en se déplaçant aux plots. Dans le même temps, ils doivent réaliser des exercices physiques (montées de genoux, talons/fesses, squat, fente, *jumping jacks*). La tâche cognitive concomitante consiste en ne pas considérer l'une des icônes, ou de restituer l'empan à partir de la fin.	Les participants doivent réaliser des exercices de renforcement musculaire, comme des squats ou des fentes. Dans le même temps, ils doivent : 1) résoudre des calculs mentaux, ou 2) alterner entre des exercices moteurs suivant un signal sonore.
ST	*Stepper (avec ou sans marche pied)*	*Équilibre*	*Force musculaire et coordination motrice*
	L'animateur montre une séquence de mouvements que les participants doivent tous reproduire en miroir (*stepper*, squat, fente, etc.). Il n'y a pas de tâche cognitive concomitante	L'animateur montre des exercices d'équilibre statique et dynamique à réaliser. Les participants doivent réaliser ces mouvements de membres inférieurs et de tronc, de passage de *medicine ball*, tout en se tenant sur un *swiss ball* ou sur une jambe. Il n'y a pas de tâche cognitive concomitante.	Les participants réalisent un jeu mélangeant des exercices de renforcement musculaire des membres inférieurs et de coordination motrice en dribblant avec une balle. Il n'y a pas de tâche cognitive concomitante.

Tableau 3 : Détails des exercices proposés durant les 3 types d'entraînements : *exergame* (EG), doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou simple tâche motrices (ST)

Un animateur supervisait les séances en donnant les instructions et en assistant les participants. Nous illustrons les différences entre les séances d'entraînement EG, DT et ST dans la figure 23, où l'animateur est mis en évidence en bleu.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

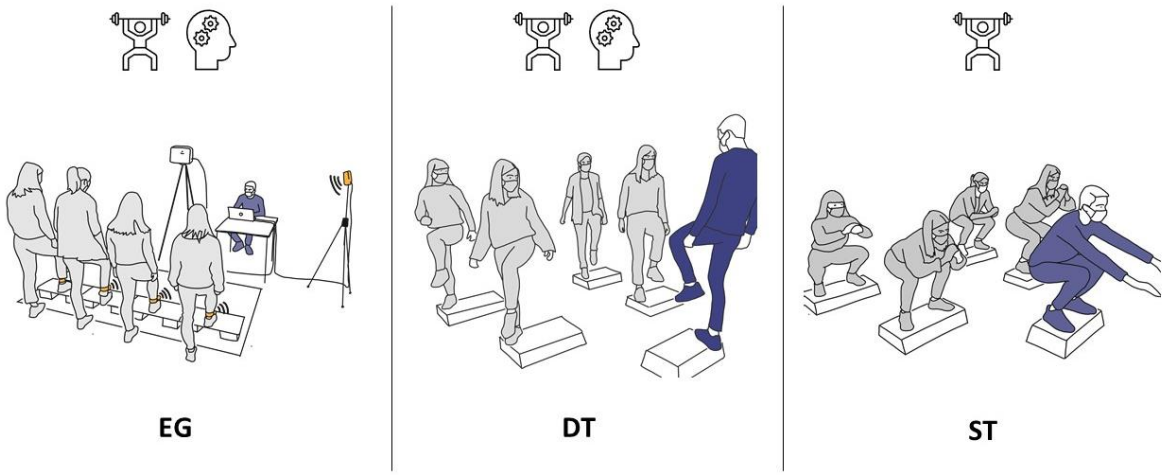


Figure 23 : Différences entre les séances d'entraînement via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST)

Nous résumons le déroulé de l'étude dans la figure 24.

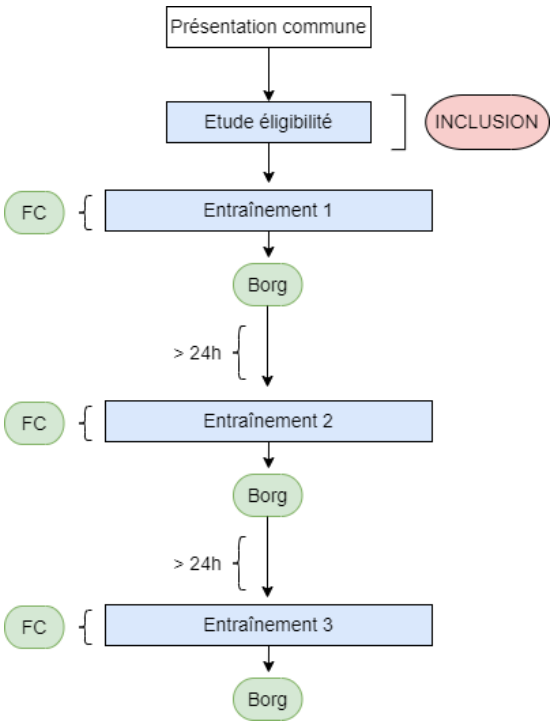


Figure 24 : Déroulé de la pré-étude évaluant l'intensité des séances d'entraînement via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST)

6.2.3. Critères de jugement

Le critère de jugement principal était le niveau d'intensité de l'exercice mesuré à l'aide de la FC moyenne et maximale durant les séances d'entraînement. Nous avons utilisé la FC car

Licence CC BY-NC-ND 3.0

celle-ci est considérée comme le paramètre le plus pratique à monitorer, particulièrement en ce qui concerne la fiabilité, la sécurité et le coût (302). Nous avons utilisé des capteurs de FC thoraciques validés Polar® H10 (Polar Electro Oy, Kempele, Finland) (303). Nous avons mesuré la FC moyenne et la FC maximale de tous les participants durant toute la durée des 3 types de séances d'entraînement.

Le critère de jugement secondaire était l'évaluation de l'intensité perçue à l'aide de l'échelle modifiée de Borg validée (304) que les participants complétaient à la fin de chaque séance d'entraînement.

6.2.4. Analyse statistique

Nous décrivons les variables quantitatives à l'aide de leur moyenne ± écart-type ou de leur médiane et leurs interquartiles suivant la normalité de la distribution des valeurs. La normalité de distribution a été évaluée à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Les comparaisons entre la FC moyenne, la FC maximale et le score à l'échelle de Borg suivant le type d'entraînement (EG, DT et ST) ont été réalisées à l'aide d'ANOVA univariée ou de test de Friedman suivant la normalité de distribution des variables concernées. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (RStudio, Inc) et la significativité des résultats a été établie pour une valeur seuil de $p < 0.05$.

6.3. Résultats

6.3.1. Statistiques descriptives

Seize jeunes adultes se sont portés volontaires pour participer à cette étude (6 hommes, 10 femmes), dont aucun n'a été non-inclus ou exclu. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 4.

Caractéristiques	Moyenne ± Ecart-type
Âge (années)	24.6 ± 3.1
Taille (m)	1.72 ± 0.11
Poids (kg)	69.1 ± 15.1
IMC	23.1 ± 3.2
FC repos (bpm)	66.9 ± 10.4
FC maximale (bpm)	187.2 ± 1.2

Tableau 4 : Caractéristiques des participants à l'étude transversale (N = 16)

bpm : battements par minute, FC : fréquence cardiaque, IMC : indice de masse corporelle, kg : kilo grammes, m : mètres.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

L'intensité de l'effort mesurée ou ressentie des participants suivant le type de séance d'entraînement réalisée est présentée dans le tableau 5. La FC moyenne est comprise entre 120 bpm lors de l'*exergame* et 128 bpm lors de l'entraînement physique en ST, correspondant respectivement à 64% et 68% de la FC maximale théorique. La FC maximale (pic atteint lors de l'entraînement) ne varie que de 6 points entre les deux types d'entraînement extremums. Enfin, la perception de l'effort exprimée par l'échelle de Borg est comprise entre 3.1 lors de l'exergame et 3.6 lors de l'entraînement en DT.

	EG	**DT**	**ST**
FC moyenne (bpm)	119.8 ± 12.2	123.8 ± 16.1	128.1 ± 14.7
% de FC maximale $_{\text{théorique}}$	64%	66%	68%
FC maximale	157.9 ± 10.1	163.0 ± 12.8	161.7 ± 14.5
Score de Borg (/10)	3.1 ± 1.4	3.6 ± 1.3	3.3 ± 1.0

Tableau 5 : FC moyenne, FC maximale et score de l'échelle de Borg suivant le type d'entraînement - via l'*exergame* (EG), en doubles tâches cognitivo-motrices (DT) ou en simple tâche motrices (ST)

FC : fréquence cardiaque, EG : *exergame*, DT : doubles tâches cognitivo-motrices, ST : simple tâche motrice.

6.3.2. Statistiques analytiques

Les distributions de la FC moyenne et de la FC maximale étaient normales, mais pas celle des scores à l'échelle de Borg modifiée. Il n'y avait aucune différence statistiquement significative entre les trois types d'entraînements EG, DT et ST pour aucune des variables étudiées : FC moyenne ($F_{(2,45)} = 1.33$, $p = 0.27$), FC maximale ($F_{(2,45)} = 0.7$, $p = 0.50$), score à l'échelle de Borg modifiée ($\chi^2_{(2)} = 1.85$, $p = 0.40$). Ainsi, il n'y avait aucune différence d'intensité mesurée ou ressentie entre 30 minutes d'entraînement via notre *exergame*, en DT ou en ST motrice pour ces 16 sujets jeunes et sains. Nous illustrons ceci en figure 25.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

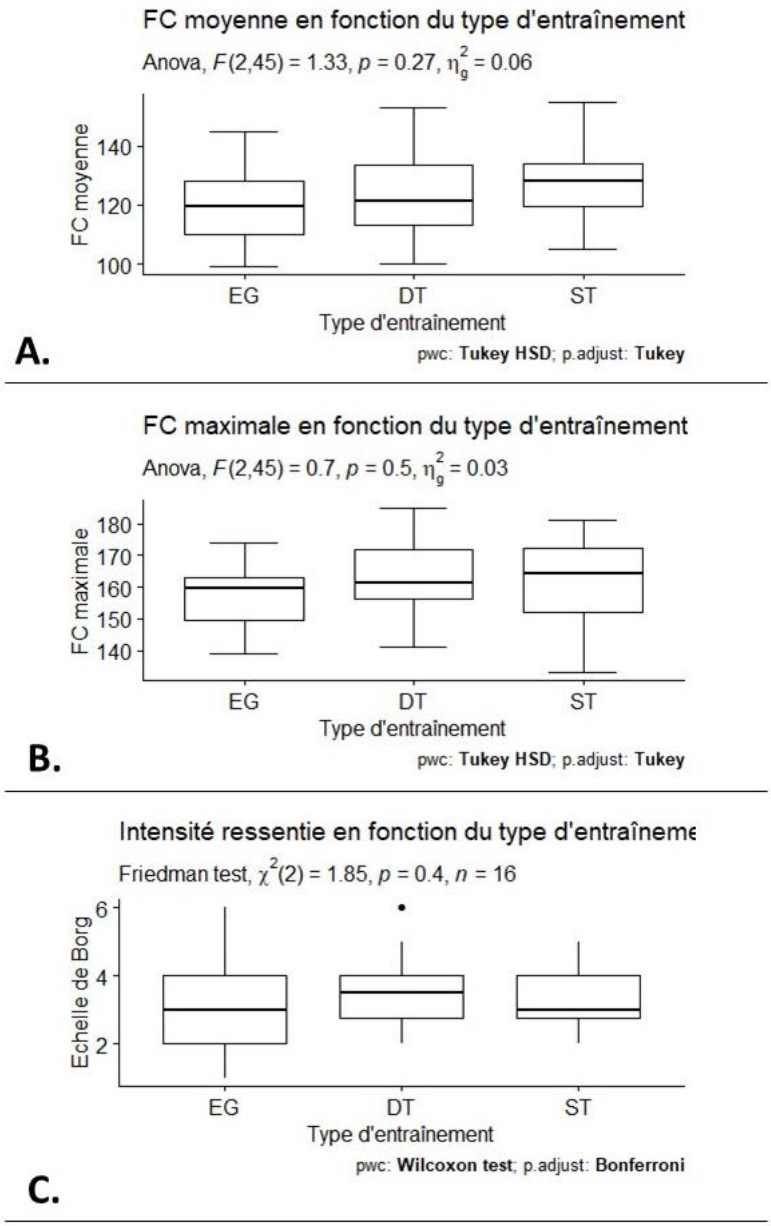


Figure 25 : Différence de FC moyenne (A), FC maximale (B) et intensité de l'effort ressenti (C) en fonction du type d'entraînement réalisé (EG, DT ou ST)

6.4. Discussion

Globalement, chez 16 individus jeunes et sains, il n'existait aucune différence d'intensité d'effort entre les séances d'entraînement (*exergame*, DT et ST). L'interprétation de ces résultats doit être faite à la lecture d'un certain nombre de paramètres. Dans cette partie, nous aborderons les explications possibles à cette absence de différences, puis les limites de notre étude, et enfin les perspectives à venir.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

6.4.1. Intensité physique

Dans notre étude, les niveaux d'intensité physique entre les différents types de séances d'entraînement (*exergame*, DT et ST) n'étaient pas statistiquement différents. Ce résultat est en désaccord avec une étude précédente qui montrait une FC moyenne supérieure en situation de DT par rapport à la situation de ST (305). Nos résultats semblent même opposés, avec une tendance pour une FC moyenne plus importante en ST de près de 10 bpm, proche des 70% de la FC maximale théorique et donc d'une intensité d'effort modérée (306). Cette différence de résultats peut s'expliquer par la nature des exercices demandés. L'intensité d'un exercice varie considérablement suivant le segment corporel impliqué (membre supérieur ou inférieur par exemple), mais aussi selon la difficulté de la tâche (fréquence et vitesse d'exécution) et selon l'expérience du participant (307–309). Dans cette étude de Herold et al., les participants devaient réaliser des squats en condition de ST, tout en réalisant une tâche cognitive supplémentaire de décompte en DT (305) – soit des DT ajoutées. Dans notre étude, les tâches cognitives et motrices étaient non seulement incorporées, plus variées, mais également plus complexes (voir tableau 3). Nous avons tenté de renforcer la reproductibilité en proposant des exercices comparables et transférables entre les différents types de séances d'entraînement. Ainsi, les exercices réalisés via l'*exergame*, en DT et en ST sont les mêmes, la différence étant dans la présence d'une seconde tâche cognitive concomitante, voire l'utilisation de notre jeu comme support. La compréhension des consignes ainsi que la correction des erreurs étaient chronophages, réduisant la durée effective d'exercice et donc la FC moyenne au cours de la séance de 30 minutes. La compréhension des consignes plus complexes pour les exercices en DT, ainsi que l'adaptation à des règles de jeu et à un environnement nouveau dans notre *exergame* ont fait perdre plus de temps effectif d'exercice qu'en ST.

Les études précédentes évaluant le niveau de sollicitation via la FC durant l'utilisation d'un *exergame* chez des adultes jeunes et sains ont montré un niveau d'intensité d'exercice physique variant de modéré (263–266) à intense (264,265,267), avec une grande variabilité entre les études suivant le matériel ou le logiciel utilisé. Notre *exergame* sur-mesure semblait induire un exercice modéré, équivalent aux mêmes exercices réalisés en situations de DT ou de ST. Ce résultat semble pertinent et intéressant : les exercices physiques en ST étant considérés comme la référence pour l'entraînement physique, l'équivalence d'intensité durant l'utilisation de notre *exergame* nous permet de considérer ce dernier comme suffisamment sollicitant pour induire des bénéfices physiques, tout en ajoutant une charge cognitive dans un environnement ludifié.

De plus, l'intensité de l'exercice mesurée à l'aide de l'échelle de Borg ne diffère pas entre les trois types de séances d'entraînement, et était globalement modérée. La perception de l'effort par les participants dans notre étude semble liée aux résultats obtenus par le pourcentage de FC maximale théorique (306). Ceci est en accord avec de précédentes études qui ont montré que les adultes estiment correctement leurs efforts physiques de basse intensité (306,310).

6.4.2. Limites

La première limite de notre étude est l'évaluation de l'intensité de l'effort induite par notre *exergame* chez des sujets jeunes plutôt que chez des séniors, cible finale de notre *exergame*. Ceci s'explique par un accès réduit aux séniors lors de la période de pré-étude dû à la pandémie mondiale de COVID-19 et les confinements qui en ont découlé.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Une seconde limite de notre étude est la petite taille de l'effectif. Toutefois, notre échantillon est homogène et montre une relative stabilité en termes de réponse à l'intensité de l'effort.

Une dernière limite pour cette étude est le critère d'évaluation de l'intensité de l'exercice physique. Nous avons ici choisi la FC pour sa reproductibilité, sa sécurité et son coût. Mais d'autres études ont utilisé des paramètres plus directs tels que la consommation de dioxygène (311,312) ou la lactatémie sanguine (313) pour évaluer l'intensité de l'exercice durant des séances d'*exergame*. De plus, le logiciel propriétaire que nous avons utilisé ne permettait pas l'analyse temporelle de la FC. Nous n'avions ainsi accès qu'à la FC moyenne et à la FC maximale atteinte durant le temps d'entraînement. Il serait intéressant d'explorer les profils de FC, afin de déterminer s'ils sont stables et proches de la FC moyenne, ou à l'inverse avec des pics et des bas, plus proche d'un entraînement en intervalle (type *high intensity training*).

6.4.3. Études futures

La plupart des *exergames* dont l'intensité a été évaluée dans des études précédentes étaient des jeux vidéo commerciaux grand public (263–265,265–267). Ceci n'est pas surprenant, car les jeux vidéo commerciaux sont les plus fréquemment utilisés en réhabilitation et rééducation (217). La conséquence principale est un manque de contrôle quantitatif et qualitatif sur les exercices proposés, tant physiques que cognitifs. La création d'un *exergame* sur-mesure permettrait de plus de s'adapter aux besoins spécifiques de l'audience (211), et l'utilisation de dispositif grand-public permettrait sa relative disponibilité et accessibilité. L'intensité physique induite par notre *exergame* mériterait d'être évaluée chez des séniors, cible finale de notre jeu conçu pour induire des bénéfices sur les déficits typiques de cette population.

Dans cette étude, nous avons évalué uniquement des aspects physiques, mais pas cognitifs. Toutefois, l'efficacité des *exergames* dépend à la fois de leurs charges physiques et de leurs charges cognitives. De plus, l'efficacité cognitive et la FC seraient corrélées : une méta-analyse a trouvé que les personnes avec de meilleures performances cognitives sont celles qui présentent également le meilleur contrôle cardiaque parasympathique (314). Cette question d'intérêt pourrait être évaluée à l'avenir en utilisant la fNIRS, dont l'utilisation pour mesurer l'activité cognitive des séniors semble validée par une revue systématique d'Audiffren et Albinet de 2017 (315). Il serait encore plus pertinent de coupler la fNIRS à de l'électroencéphalographie (316), réduisant ainsi le bruit et les artéfacts causés par les mouvements. Ces approches de mesure directe de l'activité cérébrale et indirecte par la mesure de l'oxygénation cérébrale sont hautement reproductibles et largement utilisées (317,318).

Résumé de la Partie 6

La comparaison de l'intensité de l'effort mesurée indirectement à l'aide de la FC et ressentie à l'aide de l'échelle de Borg lors de la réalisation de séances d'entraînement de 30 minutes n'étaient pas différentes suivant si ces séances étaient réalisées via notre exergame, en DT ou en ST motrice pour 16 sujets jeunes et sains.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

7. Étude principale pilote longitudinale : Effets de 12 semaines d'entraînement en DT via un *exergame* centré sur l'ICM sur les capacités cognitives, motrices et de DT de personnes âgées

Dans cette partie, nous détaillons comment et auprès de qui avons-nous évalué l'efficacité, l'attractivité et la sécurité d'un entraînement en DT réalisé via notre *exergame*. Nous détaillons également les résultats de cette étude, ainsi que les pistes explicatives desdits résultats.

7.1. Objectifs

L'efficacité des *exergames* sur les capacités motrices des séniors est débattue, et elle reste peu étudiée sur leurs capacités de DT. Dans cette étude longitudinale exploratoire, nous avons évalué l'attractivité, la sécurité, mais surtout l'efficacité de notre *exergame* sur un certain nombre de paramètres cognitifs et moteurs après 3 mois d'entraînement chez des séniors.

7.1.1. Objectif principal

L'objectif principal était de comparer les capacités d'équilibre en DT chez des personnes âgées par posturographie lors de la réalisation concomitante d'un test de Stroop avant (T1) et après (T2) un programme d'entraînement en DT de 3 mois ayant pour support notre *exergame* dans un échantillon unique de personnes âgées.

7.1.2. Objectifs secondaires

Les objectifs secondaires étaient d'explorer l'efficacité d'un programme d'entraînement en DT ayant pour support notre exergame avant entraînement (T1), après entraînement (T2) et après une période de suivi sans intervention (T3) sur les capacités cognitives et motrices des participants. Nous avons également évalué l'impact d'un tel entraînement sur le niveau de qualité de vie, de motivation, de peur de tomber et d'activité physique des participants ainsi que leur exploration de la ville. Nous avons enfin souhaité explorer les caractéristiques de notre programme d'entraînement en DT ayant pour support notre *exergame* concernant la sécurité (apparition d'évènements indésirables graves) et l'adhérence (adhésion, présence, et complétion).

7.2. Méthode

Dans cette première partie, nous détaillons le protocole de cette étude pilote longitudinale, qui a fait l'objet d'une publication (319) présentée en annexe 3.

Article 3 : Gallou-Guyot M., Mandigout S., Almeida-Prado P.S., Marie R., Daviet J.C., Perrochon A. (2022). Exergame and cognitive-motor dual-task training in the healthy elderly (INCOME): a study protocol. European Rehabilitation Journal.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

7.2.1. Participants

7.2.1.1. Éligibilité

Les critères d'inclusion étaient d'avoir plus de 65 ans, de résider dans l'une des résidences autonomie municipales (RAM) de la Ville de Limoges (Durkheim, Casseaux ou Cervières – Imbert) ou d'être adhérent à un club sénior du centre communal d'actions sociales, d'avoir une vision et une ouïe normale ou corrigée, et d'être capable de marcher et rester debout durant 30 secondes sans assistance (une canne comme aide technique maximale autorisée).

Les critères de non-inclusion étaient de présenter des troubles psychiatriques ou pathologies neurologiques (accidents cardio-vasculaires, maladie de Parkinson, maladie d'Alzheimer, démence) diagnostiqués, une prise médicamenteuse affectant la marche ou l'équilibre, une nécessité d'aide technique (double canne-béquille, déambulateur), une inaptitude à réaliser le programme d'entrainement proposé, ou bien d'être sous curatelle ou tutelle ou sous sauvegarde de justice, non affilié à la sécurité sociale, ou en incapacité de comprendre le protocole.

Les critères d'exclusion étaient toute apparition de blessure ou de douleur significative en lien avec le programme d'entraînement, ou bien un retrait de consentement à participer à cette étude pendant ou après la collecte de données.

7.2.1.2. Recrutement

Nous avons proposé aux adhérents de clubs séniors rattachés au centre communal d'actions sociales ainsi qu'aux habitants des trois RAM de la Ville de Limoges concernées d'être volontaires pour ce protocole. Le recrutement s'est fait par vagues afin de recruter un maximum de participants tout en respectant la limite du nombre de participants par groupes.

L'investigateur principal présentait l'étude aux participants potentiels lors de réunions communes. Les volontaires étaient reçus individuellement pour une étude d'éligibilité. S'ils remplissaient les critères d'inclusion et donnaient leur consentement écrit (modèle disponible en ligne[16]), ils étaient inclus et recevaient alors une note d'information (disponible en ligne[17]). Les feuillets de consentement ainsi que les notices étaient édités en double, une copie étant fournie au participant et l'autre conservée par l'investigateur principal.

7.2.1.3. Taille de l'effectif

Le calcul de la taille de l'effectif était basé sur une précédente étude Fraser et al. évaluant le contrôle postural de séniors durant la réalisation d'une tâche cognitive concomitante (320). Nous avons posé l'hypothèse que notre programme d'entraînement améliorerait de 30% la vitesse d'oscillation du centre de pression ($mm.s^{-1}$) durant la réalisation d'un test de Stroop. Nous avons estimé alors le nombre de sujets nécessaire à 32 pour notre échantillon avec une puissance à 0.80 et un risque α à 0.05. À ce chiffre, nous ajoutons 20% pour les perdus de

[16] Le lien direct vers le document écrit de consentement est https://drive.google.com/file/d/1IMB74E3v4jjLiJdted6-5RtkqGO9XGJx/view?usp=sharing

[17] Le lien direct vers la notice d'information est https://drive.google.com/file/d/18MUeCdI9GZ5z213VnRLqkiiQ4K5wHxHS/view?usp=sharing

Licence CC BY-NC-ND 3.0

vue, faisons passer notre nombre de sujets nécessaires à 39 participants. Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel G*Power version 3.1.9.5.

7.2.2. Procédure

7.2.2.1. Conception et paramètres d'étude

Le projet INCOME est une étude pilote prospective multicentrique de 24 semaines. L'unité de recherche HAVAE de l'université de Limoges a conduit cette étude en Nouvelle-Aquitaine, France, et le centre hospitalo-universitaire (CHU) de Limoges s'est porté promoteur. Le protocole de cette étude a été construit en accord avec le guide *Standard Protocol Items: Recommendations for Interventional Trials* (SPIRIT). Les participants ont réalisé une évaluation initiale (T1), 12 semaines d'entraînement en DT à l'aide de notre *exergame*, une évaluation finale (T2), puis 12 semaines de suivi sans entraînement et une évaluation de suivi (T3). Le détail du déroulé de l'étude est présenté en figure 26.

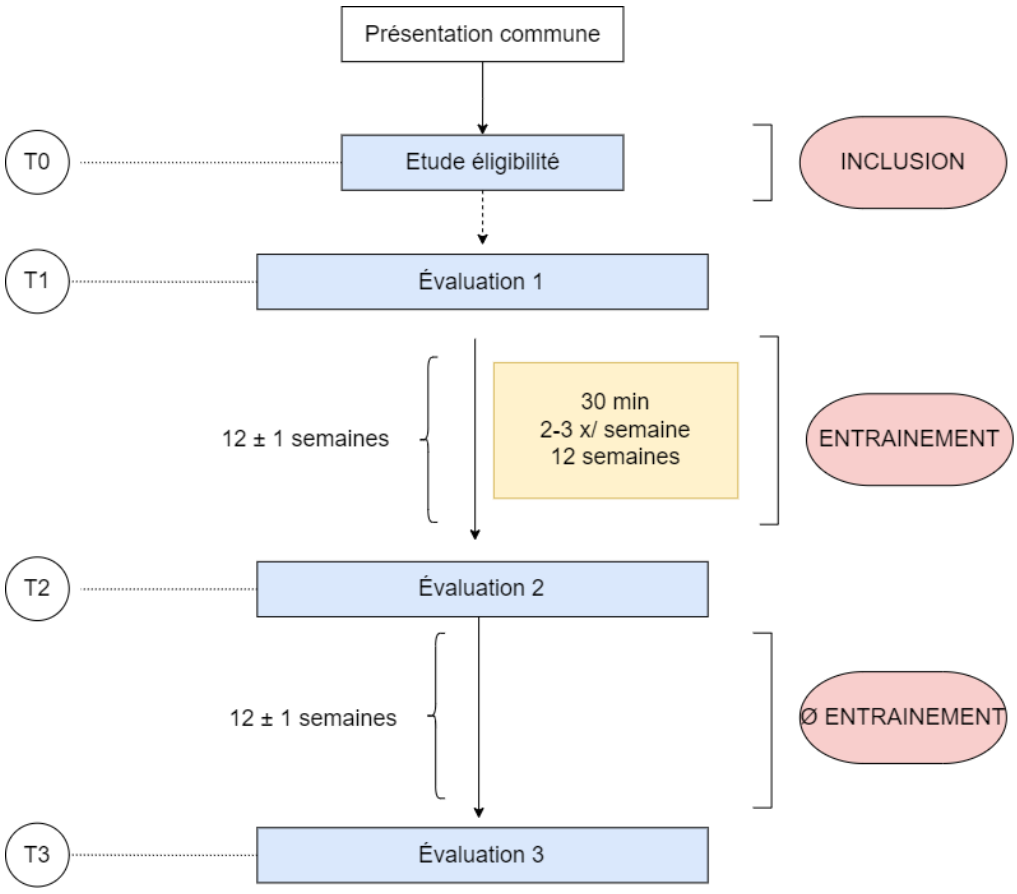


Figure 26 : Déroulé de l'étude pilote longitudinale

7.2.2.2. Programme d'entraînement

Basé sur les recommandations de dose de la littérature (289), notre programme d'entraînement consistait en 2 à 3 sessions de jeu collectives de 30 minutes par semaines durant 12 semaines (2 séances les semaines paires, 3 séances les semaines impaires) pour

Licence CC BY-NC-ND 3.0

un total de 30 séances d'entraînement. Les groupes de 4 participants étaient constitués selon les disponibilités des participants ainsi que leurs affinités. Nous avons utilisé notre *exergame* comme support d'entraînement dont le mode de fonctionnement est détaillé en section 5.3. Le contenu des séances ainsi que les modalités d'exercices du programme d'entraînement que nous avons proposé aux séniors étaient basés sur les recommandations issues de la littérature (voir section 5.1). La quinzaine d'exercices proposés d'environ 3 minutes ainsi que leurs variations de difficulté sont détaillés en section 5.3.2 ; nous illustrons la réalisation d'un exercice de *stepper* concomitant à une tâche d'inhibition mentale en figure 27. L'intégralité du programme d'entraînement incrémental sur 12 semaines est accessible en ligne[18]. La progression se faisait au sein et au fil des séances et des semaines. Le passage à un niveau plus complexe était déterminé par la réussite du niveau actuel, à l'appréciation de l'animateur.

Figure 27 : Réalisation d'un exercice de passage du pas incluant de l'inhibition mentale par deux participantes

Nous proposons une illustration de notre protocole par le biais d'une vidéo réalisée par le service média de la municipalité de Limoges accessible via le QR code[19] présenté en figure 28.

[18] Le lien direct vers notre programme d'entraînement incrémental sur 12 semaines est https://drive.google.com/file/d/1JtMrS7LckQMD9pyAaSuHZ8hmf4_8AfWw/view?usp=sharing

[19] Le lien direct vers cette vidéo est https://www.youtube.com/watch?v=yeb-704OSb8

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 28 : QR code renvoyant vers une vidéo de démonstration du protocole du projet INCOME

7.2.3. Critères de jugement

7.2.3.1. Critère de jugement principal

Le critère de jugement principal de cette étude était l'analyse entre T1 et T2 de la vitesse d'oscillation du centre de pression ($mm.s^{-1}$) évaluée à l'aide d'une plateforme de stabilométrie (Win-Posturo, Médicapteurs®) durant la réalisation concomitante d'un test de Stroop. Le contrôle postural en condition de DT est couramment utilisé dans les études chez les personnes âgées (180,197,320–326). Durant cette évaluation, le participant se tenait debout sur la plateforme, les bras le long du corps, selon les conditions d'évaluations préconisées (327). Il lui était demandé de contrôler sa posture, de se tenir le plus fixe possible, et de réaliser un test de Stroop durant 30 secondes. Ce test de Stroop était présenté sur un poster de 2 mètres sur 1 mètre attaché au mur, à 1.5 mètre de la plateforme.

7.2.3.2. Critères de jugement secondaires

Les critères de jugement secondaires sont présentés en tableau 6.

Cognition	**Inhibition mentale** : Durant le test de Stroop (328), le participant devait distinguer le nom de la couleur écrite de la couleur de l'écriture utilisée de 100 mots. Le score correspondait au temps pour réaliser le test (s) et au taux d'erreurs commises.
	Flexibilité mentale : Durant le TMT (329), le participant devait relier une séquence consécutive de 25 cibles par ordre croissant : d'abord des chiffres - partie A - (1, 2, 3, etc.) puis une alternance entre chiffres et lettres - partie B - (1, A, B, 2, C, 3, etc.). Le score correspondait à la différence entre le temps pour réaliser la partie A et la partie B du test (s).
	Mémoire de travail : Durant le test de N-Back visuel (330), une séquence continue de 30 lettres était présentée au participant, qui devait indiquer continuellement la lettre précédemment affichée. Le score correspondait au taux d'erreurs commises.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Motricité	**Équilibre postural en ST** : L'évaluation consistait en l'étude de la vitesse d'oscillation du centre de pression ($mm.s^{-1}$) sur une plateforme stabilométrique (WIN-POSTURO, Médicapteurs®) en condition de ST. Durant l'évaluation, le participant se tenait debout sur la plateforme, les bras le long du corps. Il lui était demandé de contrôler sa posture, de se tenir le plus fixe possible, et de réaliser un test de Stroop durant 30 secondes. **Mobilité** : Durant le test de TUG (331), le participant devait se lever de son fauteuil, marcher sur 3 mètres, tourner autour d'une marque au sol, retourner à son fauteuil et se rassoir. Le score correspondait au temps de réalisation (s). **Équilibre** : Durant l'échelle d'équilibre de Berg (*Berg Balance Scale* BBS) (332), le participant devait réaliser 14 exercices d'équilibre, allant de se lever de sa chaise à se tenir sur un pied. Le score correspondait à une échelle de 0 à 56 obtenu en cumulant les 14 items. L'association entre la sensibilité du TUG et la spécificité du BBS est recommandée pour l'évaluation des séniors (333).
Caractéristiques des participants	**Qualité de vie** : Nous avons étudié la qualité de vie des participants à l'aide du questionnaire EuroQol à 5 dimensions et 5 niveaux (EQ5D5L) (334). Ce questionnaire se décompose en 5 dimensions notées entre 1 et 5, et une évaluation de l'état de santé général noté sur 100. **Motivation** : La motivation était évaluée à l'aide de l'échelle de motivation pour l'activité physique à des fins de santé (EMAPS) (335). Cette échelle se décompose en 6 dimensions notées de 3 à 21. **Peur de tomber** : L'échelle *falls efficacy scale international* (FES-I) (336) évalue la crainte des participants concernant leur risque de chute lors de la réalisation d'actions du quotidien. Le score est compris entre 16 et 64 et correspondait au cumul des 16 items.
Caractéristiques du programme	**Sécurité** : Nous avons réalisé une analyse qualitative et quantitative des évènements indésirables graves apparus durant l'intervention en lien ou non avec notre *exergame* (nombre, nature, sévérité et causes). **Adhésion** : L'adhésion était calculée par le rapport entre nombre de personnes recrutées et le nombre de personnes éligibles. **Présence ou réalisation** : La compliance quantitative était calculée par le nombre de séances effectivement réalisées par rapport au nombre de séances totales effectivement proposées. **Complétion** : La complétion était calculée par le nombre d'individus allant jusqu'au terme du programme d'entraînement, c'est-à-dire l'inverse des abandons (ou *drop-outs*).
Activité physique	**Activité physique autodéclarée** : Le questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées (QAPPA) (337) était utilisé pour évaluer le niveau d'intensité d'activité physique moyen hebdomadaire (MET/min/semaine). **Activité physique mesurée** : Le port d'un capteur d'activité physique mobile Armband® (SenseWear, Bodymedia) durant 7 jours consécutifs permettait la mesure de la dépense énergétique active (kcal), de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

	l'intensité de la dépense énergétique active (MET) et du nombre de pas (338).
	L'exploration de la ville : Par le biais de rapports hebdomadaires auprès des participants, nous évaluons leur exploration de la ville en investiguant le nombre de sorties de leur domicile, ainsi que la fréquence de visite des points d'intérêt mis en avant par le biais de l'*exergame* (parcs, jardins, bâtiments, etc.).

Tableau 6 : Critères de jugement secondaires de l'étude pilote longitudinale

BBS : *Berg balance scale,* DT : doubles tâches, EMAPS : échelle de motivation pour l'activité physique à des fins de santé, EQ5D5L : *EuroQol 5 dimensions 5 levels*, FES-I : *falls efficiency scale international, kcal*: kilo calories, MET : *metabolic equivalent task* ou équivalent métabolique, min : minutes, QAPPA : questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées, s: secondes, ST : simple tâche, TMT : *trail making test*, TUG *: timed up-and-go*.

7.2.4. Analyse statistique

Les variables quantitatives à T1, T2 et T3 sont décrites selon moyenne ± écart type ou médiane et intervalle interquartile. Nous réalisons une analyse *per protocol* fondée sur les données disponibles (non manquantes). La normalité de distribution des variables est réalisée à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (RStudio, Inc) et la significativité des résultats a été établie pour une valeur seuil de $p < 0.05$.

L'analyse principale consiste en la comparaison avant/après entraînement (entre T1 et T2) du contrôle postural en DT évalué par plateforme stabilométrique, et est réalisée par un test t de Student apparié si les conditions d'application sont réunies, ou par un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney.

L'analyse secondaire consiste en la comparaison des différences entre l'effet « entraînement » (T1-T2), « suivi » (T2-T3) et « global » (T1-T3) sur l'ensemble des critères de jugement secondaires. Elle est réalisée à l'aide de tests t de Student appariés si les conditions d'application sont réunies, ou par un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney. La correction du risque d'erreur est faite par une correction de type Holm-Bonferronni (339,340). Le passage par des tests statistiques deux à deux de préférence à des ANOVA à un facteur (temps) est un choix méthodologique fait par les méthodologistes du CHU de Limoges s'expliquant par le caractère exploratoire de cette étude ainsi que la différence d'effectif entre T2 et T3.

7.2.5. Éthique

Cette étude a été construite et réalisée en accord avec les principes de bonnes pratiques cliniques de la déclaration d'Helsinki. Ce projet a reçu une autorisation de la part du comité de protection des personnes Sud-Est 2 (numéro de référence : 2020-A02805-34) dont l'avis favorable est disponible en ligne[20]. Toute modification significative du protocole a fait l'objet

[20] Le lien direct vers l'avis favorable du comité de protection des personnes est https://drive.google.com/file/d/1RPWsH7iCrXDxPKh93VA2uzGSQHK_-KzF/view?usp=sharing

Licence CC BY-NC-ND 3.0

d'une demande d'amendement auprès du comité avant son implémentation. Cette étude a également été enregistrée sur ClinicalTrials.gov (référence : NCT04803799).

7.3. Résultats

7.3.1. Statistiques descriptives

Trente-neuf personnes âgées saines ont participé à cette étude (10 hommes, 29 femmes). 21 personnes possédaient une canne simple, les 18 autres ne nécessitaient pas d'aide technique. Concernant les niveaux d'éducation maximum, 28 étaient allés jusqu'au certificat d'études, 9 jusqu'à un équivalent de baccalauréat professionnel, et 2 jusqu'à un équivalent de baccalauréat. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 7 ; toutes les distributions suivaient une loi normale.

Caractéristiques	**Moyenne ± ET [min ; max]**			
	Globale (n = 39)	**RAM 1 (n = 18)**	**RAM 2 (n = 17)**	**RAM 3 (n = 4)**
Âge (années)	84.6 ± 8.5 [66 ; 97]	84.8 ± 8.4 [67 ; 97]	84.9 ± 9.6 [66 ; 97]	82.8 ± 5.0 [79 ; 90]
Taille (m)	161.1 ± 8.1 [150 ; 182]	160.5 ± 7.8 [150 ; 182]	161.7 ± 9.4 [150 ; 180]	161.6 ± 3.9 [156 ; 165]
Poids (kg)	66.5 ± 12.0 [40 ; 90]	66.8 ± 11.5 [42 ; 82]	65.4 ± 13.9 [40 ; 90]	69.8 ± 3.4 [66 ; 75]
IMC	25.6 ± 4.3 [17.1 ; 39.0]	25.9 ± 3 .9 [18.2 ± 32.9]	25.0 ± 5.1 [17.1 ; 39.0]	26.8 ± 1.4 [24.8 ; 27.9]

Tableau 7 : Caractéristiques des participants à l'étude longitudinale (N = 39)

ET : écart type, F : femmes ; H : hommes ; IMC : indice de masse corporelle, kg : kilo grammes, m : mètres, min : minimum ; max : maximum. RAM 1 : Casseaux ; RAM 2 : Durkheim ; RAM 3 : Cervières.

Globalement, sur 44 personnes éligibles, 39 se sont engagées dans notre programme d'entraînement et ont passé les évaluations initiales (T1), 34 sont allées jusqu'au terme du programme d'entraînement (T2), et 22 sont allées jusqu'au terme de la période de suivi (T3). Ceci est détaillé dans le diagramme de flux des participants présenté en figure 29. L'adhésion globale était de 89%, la réalisation moyenne de 88% (3 séances manquées sur 26 séances proposées) et la complétion moyenne de 87%. Aucun évènement indésirable grave en lien avec notre jeu ne s'est produit durant la période d'entraînement (286 séances proposées réparties sur 11 groupes, soit 8580 minutes d'entraînement). Ainsi, le niveau de sécurité de notre *exergame* était de 100%.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

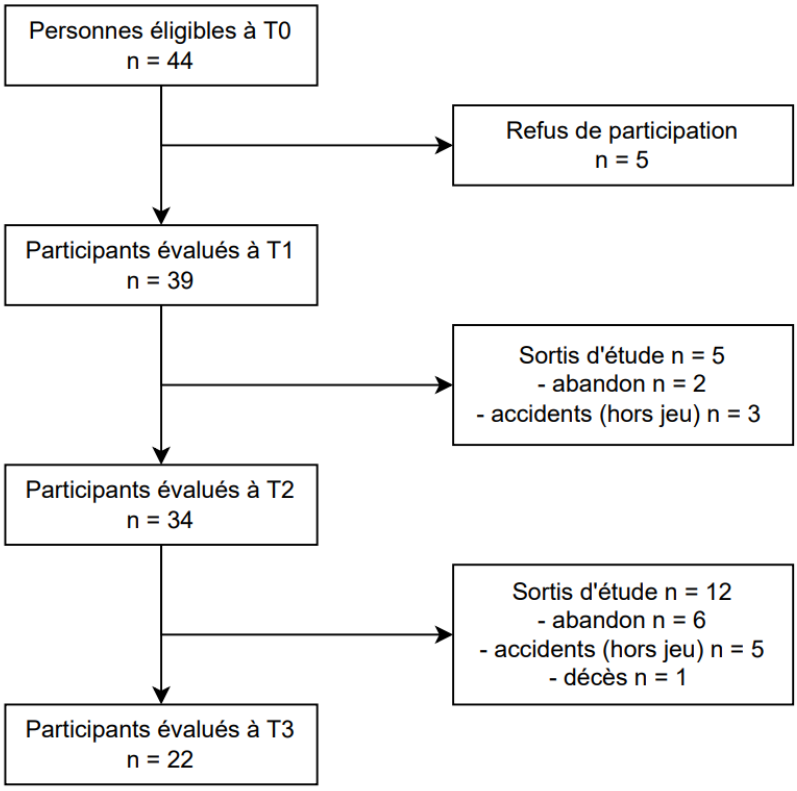


Figure 29 : Diagramme de flux des participants à l'étude pilote longitudinale

7.3.2. Statistiques analytiques

7.3.2.1. Résultat principal

La distribution des valeurs de la différence entre T1 et T2 pour la vitesse d'oscillation (mm.s^{-1}) sur plateforme stabilométrique ne suivait pas une loi normale (p = 0.002). La comparaison des moyennes des vitesses d'oscillation de 33 participants à T1 et T2 était non significative (p = 0.254). Cette comparaison est illustrée en figure 30.

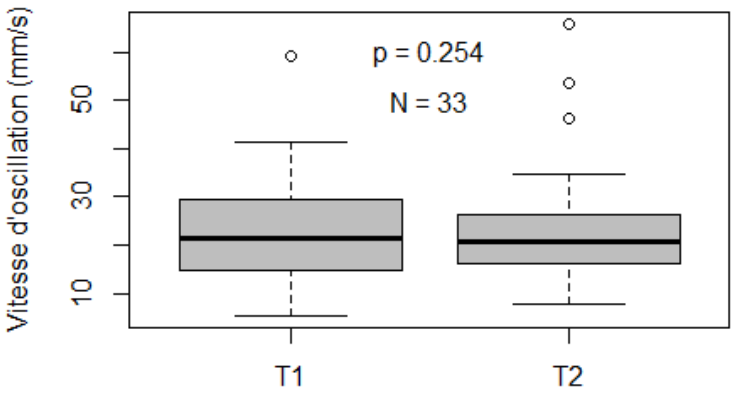


Figure 30 : Différence de vitesse d'oscillation (en mm.s^{-1}) lors de la réalisation d'une tâche cognitive concomitante avant (T1) et après (T2) 3 mois d'entraînement

Licence CC BY-NC-ND 3.0

7.3.2.2. Résultats secondaires

Les valeurs moyennes ou médianes pour l'ensemble des paramètres ainsi que la comparaison des moyennes ou des rangs entre T1, T2 et T3 sont présentées dans le tableau 8 ci-dessous.

Effets de l'entraînement (comparaison T1 – T2)

Sur le plan cognitif, nous observons un effet significatif de l'entraînement avec un progrès de 65% pour la mémoire de travail mesurée par test de N-Back visuel (p = 0.000), passant d'un taux d'erreurs médian de 57% à 20% entre T1 et T2 chez 33 participants. Nous n'observons pas d'effet de l'entraînement sur l'inhibition mentale (test de Stroop) ou la flexibilité mentale (TMT).

Sur le plan des DT, nous mesurons également un effet significatif de l'entraînement avec un progrès de 37% pour le taux d'erreur au Stroop en situation de DT (p = 0.002), passant d'un taux d'erreurs médian de 15% à 9.5% entre T1 et T2 chez 33 participants.

Aucun autre paramètre ne ressort comme significativement différent entre T1 et T2. Nous n'observons ainsi aucun effet de l'entraînement sur le plan moteur, que ce soit concernant le contrôle postural, l'équilibre ou la mobilité. Nous n'observons pas non plus d'effet de l'entraînement sur la qualité de vie, la motivation, la peur de tomber ou le niveau d'activité physique des participants. Les données d'exploration de la ville étant systématiquement manquantes (sortie de domicile et visite des points d'intérêt mis en avant dans le jeu), elles ne sont pas présentées dans le tableau 8.

Effets de l'arrêt de l'entraînement (comparaison T2 – T3)

Nous n'observons aucune différence significative entre T3 et T2 pour l'ensemble des paramètres étudiés. Ainsi, les performances cognitives, motrices et de DT ainsi que la qualité de vie, le niveau de motivation, de peur de tomber et d'activité physique sont les mêmes après 3 mois de suivi.

Les gains cognitifs et en DT obtenus après entraînement sont donc maintenus. Concernant la mémoire de travail, le taux d'erreurs médian au N-Back visuel passe de 20% à 6% entre T2 et T3 chez 22 participants (p = 0.664). Concernant l'inhibition mentale en DT, le taux d'erreurs médian au test de Stroop en DT passe de 9.5% à 7% entre T2 et T3 (p = 0.564).

Les données d'exploration de la ville étant systématiquement manquantes (sortie de domicile et visite des points d'intérêt mis en avant dans le jeu), elles ne sont pas présentées dans le tableau 8.

Effets globaux de l'intervention (comparaison T1 – T3)

Sur le plan cognitif, nous observons un effet significatif de l'intervention avec un progrès de 11% pour l'inhibition mentale mesurée par le test de Stroop (p = 0.000), passant d'un temps de réalisation moyen de 223 à 198 secondes entre T1 et T3 chez 22 participants. Nous observons également un effet significatif de l'intervention avec un progrès de 90% pour la mémoire de travail mesurée par N-Back visuel (p = 0.000), passant d'un taux d'erreurs médian de 57% à 6% entre T1 et T3 chez 22 participants. Nous n'observons pas d'effets de l'intervention sur la flexibilité mentale (TMT).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Sur le plan moteur, nous observons un effet significatif de l'intervention avec un progrès de 9% pour l'équilibre dynamique mesuré par BBS (p = 0.002), passant d'un score moyen de 44.3 à 48.2 entre T1 et T3 chez 21 participants. Nous n'observons pas d'effets de l'intervention sur l'équilibre postural en ST mesuré par posturographie ni sur la mobilité (TUG).

Sur le plan des DT, nous observons un effet significatif de l'intervention avec un progrès de 53% pour le taux d'erreurs au Stroop en situation de DT (p = 0.019) dont le score médian passe de 15% à 7% entre T1 et T3 chez 22 participants.

Aucun autre paramètre ne ressort comme significativement différent entre T1 et T3. Nous n'observons ainsi aucun effet de l'intervention sur la qualité de vie, la motivation, la peur de tomber ou le niveau d'activité physique des participants. Les données d'exploration de la ville étant systématiquement manquantes (sortie de domicile et visite des points d'intérêt mis en avant dans le jeu), elles ne sont pas présentées dans le tableau 8.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Matthieu Gallou-Guyot | Thèse de doctorat | Université de Limoges |
Licence CC BY-NC-ND 3.0

	T1	T2	T3	Comparaisons p_{T1-T2}	p_{T2-T3}	p_{T1-T3}
COGNITIF						
Stroop ST						
temps (s)	223 ± 79 [a]	220 ± 76 [e]	198 ± 69 [j]	0.912	0.153	**0.000***
% erreurs [$]	8.0 [5.0 ; 16.0] [a]	7.0 [2.0 ; 10.3] [e]	5.0 [2.5 ; 12.5] [j]	**0.007**	0.454	0.195
TMT (B-A) - temps (s)	145 ± 79 [d]	142 ± 67 [i]	100 ± 37 [m]	0.439	0.255	**0.044**
N-Back - % erreurs [$]	56.7 [33.3 ; 76.7] [b]	20.0 [1.7 ; 50.0] [f]	6.0 [0.8 ; 9.5] [j]	**0,000***	0.664	**0.000***
MOTEUR						
Equilibre postural en ST ($mm.s^{-1}$)	20.80 [13.67 ; 25.92] [a]	19.53 [13.67 ; 30.64] [f]	21.14 [15.16 ; 31.41] [j]	0.208	**0.043**	**0.07**
TUG - temps (s)	13.4 [10.3 ; 17.1] [a]	13.1 [11.5 ; 18.1] [e]	13.0 [11.8 ; 16.3] [j]	0.741	0.935	0.219
BBS [0 ; 56]	44.3 ± 8.2 [d]	47.4 ± 8.9 [h]	48.2 ± 5.5 [k]	**0.014**	0.099	**0.002***
DT						
Equilibre postural en DT ($mm.s^{-1}$)	21.43 [14.54 ; 29.76] [b]	20.73 [15.64 ; 29.30] [f]	24.03 [13.96 ; 33.49] [j]	0.254	**0.031**	**0.05**
Stroop DT - % erreurs [$]	15.0 [7.7 ; 30.1] [b]	9.5 [2.3 ; 16.5] [f]	7.0 [3.9 ; 18.6] [j]	**0,002***	0.564	**0.019***
ACTIVITE PHYSIQUE						
QAPPA (MET/min/semaine)	300 [120 ; 620] [d]	520 [360 ; 1200] [h]	600 [160 ; 1020] [k]	**0.031**	0.255	0.589
Capteurs Armbands						
DEA (kcal)	59.5 [5.5 ; 266] [b]	133 [10.5 ; 263] [f]	123 [2.5 ; 317] [j]	0.906	0.433	0.259
DEA (MET)	1.25 [1.12 ; 1.39] [b]	1.24 [1.10 ; 1.33] [f]	1.05 [1.0 ; 1.41] [j]	**0.007**	0.313	**0.026**
Nombre de pas	815 [286 ; 2310] [b]	784 [273 ; 2608] [f]	956 [295 ; 2023] [j]	**0.025**	0.592	**0.036**

Tableau 8 : Valeurs moyennes ou médianes des mesures à T1, T2 et T3.

Les valeurs de p correspondent aux valeurs obtenues aux tests de student ou Wilcoxon appariés. Les valeurs de p significatives avant correction sont mises en évidence en gras. Les valeurs de p significatives après correction selon la méthode Holm-Bonferroni sont mises en évidence en gras avec un astérisque. Nombre d'observations : a = 39, b = 38, c = 37, d = 36, e = 34, f = 33, g = 32, h = 31, i = 30, j = 22, k = 21, m = 16.

BBS : *Berg balance scale*, DEA : dépense énergétique active, DT : double-tâches cognitivo-motrices, kcal : kilo calories, MET : équivalent métabolique, min : minutes, mm : millimètres, s : secondes, ST : simple tâche, TMT : *trail making test*, TUG : test du *timed-up and go*. $: les pourcentages d'erreurs correspondent au nombre d'erreurs rapporté au nombre de réponses.

Matthieu Gallou-Guyot | Thèse de doctorat | Université de Limoges |
Licence CC BY-NC-ND 3.0

	T1	T2	T3	Comparaisons p_{T1-T2}	p_{T2-T3}	p_{T1-T3}
CARACTERISTIQUES						
Qualité de vie – EQ5D5L						
Mobilité [1 ; 5]	2.0 [1.0 ; 3.0] [d]	2.0 [2.0 ; 3.0] [h]	1.0 [1.0 ; 3.0] [k]	0.110	0.132	0.871
Autonomie [1 ; 5]	1.0 [1.0 ; 2.0] [d]	1.0 [1.0 ; 2.0] [h]	1.0 [1.0 ; 1.5] [k]	0.499	0.527	0.739
AVQ [1 ; 5]	1.0 [1.0 ; 3.0] [d]	1.0 [1.0 ; 2.0] [h]	2.0 [1.0 ; 2.0] [k]	0.953	0.627	0.705
Douleurs [1 ; 5]	2.5 [2.0 ; 3.0] [d]	3.0 [2.0 ; 4.0] [h]	3.0 [2.0 ; 3.0] [k]	0.793	0.896	0.999
Dépression [1 ; 5]	2.0 [1.0 ; 3.0] [d]	2.0 [1.0 ; 3.0] [h]	2.0 [1.5 ; 3.0] [k]	0.686	0.740	0.518
Santé (/100)	67.39 ± 18.15 [d]	66.19 ± 18.29 [h]	66.90 ± 17.58 [k]	0.278	0.923	0.645
Motivation – EMAPS						
Motivation intrinsèque [3 ; 21]	16.0 [13.0 ; 18.0] [c]	15.5 [14.0 ; 18.0] [i]	18.0 [15.0 ; 20.5] [k]	0.574	0.199	**0.029**
Motivation extrinsèque intégrée [3 ; 21]	12.0 [9.5 ; 16.5] [c]	14.0 [8.0 ; 18.0] [i]	12.0 [9.5 ; 18.0] [k]	0.914	0.697	0.504
Motivation extrinsèque identifiée [3 ; 21]	17.0 [14.5 ; 19.5] [c]	18.0 [16.8 ; 19.3] [i]	18.0 [16.5 ; 21.0] [k]	0.078	0.582	**0.045**
Motivation extrinsèque introjectée [3 ; 21]	13.0 [11.0 ; 15.0] [c]	14.0 [11.0 ; 16.0] [i]	15.0 [12.5. 17.0] [k]	0.279	0.445	0.087
Motivation extrinsèque externe [3 ; 21]	5.0 [3.0 ; 8.5] [c]	5.0 [3.0 ; 8.0] [i]	3.0 [3.0 ; 7.0] [k]	0.943	0.422	0.441
Amotivation [3 ; 21]	4.0 [3.0 ; 9.5] [c]	3.5 [3.0 ; 6.0] [i]	4.0 [3.0 ; 7.5] [k]	0.536	0.806	0.510
Peur de tomber – FES-I [16 ; 64]	25 [21 ; 33] [d]	28 [31 ; 35] [h]	25 [23 ; 30.5] [k]	0.182	0.443	0.840

Tableau 8 (suite) : Valeurs moyennes ou médianes des mesures à T1, T2 et T3.

Les valeurs de p correspondent aux valeurs obtenues aux tests de student ou Wilcoxon appariés. Les valeurs de p significatives avant correction sont mises en évidence en gras. Les valeurs de p significatives après correction selon la méthode Holm-Bonferroni sont mises en évidence en gras avec un astérisque. Nombre d'observations : a = 39, b = 38, c = 37, d = 36, e = 34, f = 33, g = 32, h = 31, i = 30, j = 22, k = 21, m = 16.

AVQ : activités de la vie quotidienne, EMAPS : échelle de motivation pour l'activité physique à des fins de santé, EQ5D5L : questionnaire EuroQol 5 dimensions 5 niveaux, FES-I : *falls efficiency scale international*, QAPPA : questionnaire d'activité physique pour personnes âgées.

7.3.2.3. Analyse complémentaire exploratoire qualitative

En plus de l'analyse statistique prévue dans notre méthodologie d'étude, nous proposons une analyse complémentaire exploratoire qualitative inspirée par l'aspect de nos résultats. Dans cette partie, nous aborderons l'effet de la DT sur les performances cognitives et motrices, et l'impact qu'a pu avoir l'entraînement sur cet effet de la DT.

Effet de la DT (DTE) sur les performances cognitives et motrices

Nous basant sur le modèle théorique de Plummer et al. (96), nous avons choisi de représenter l'effet de la DT (ou *dual task effect* DTE) sur les performances de chacun de nos participants avant et après entraînement. Pour rappel, cet effet de la DT correspond à la différence de performance lorsqu'une tâche est réalisée en DT ou en ST. Cet effet peut être positif (mélioratif) ou bien négatif (délétère). Ceci est illustré en figure 31.

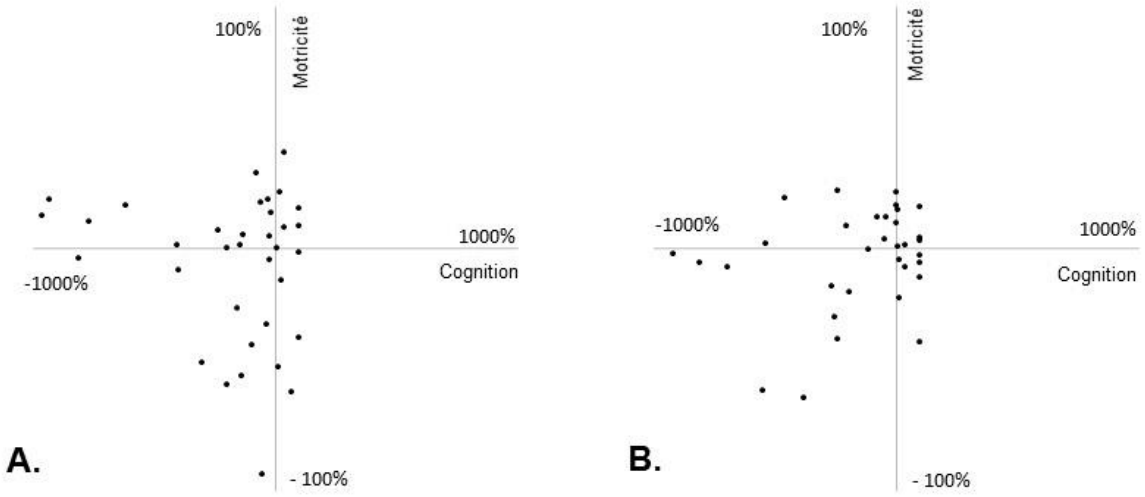


Figure 31 : Effet de la DT (*dual task effect* DTE) sur les performances cognitives et motrices à T1 et T2

A. Effet de la DT sur les performances cognitives et motrices à T1 (n = 35), B. Effet de la DT sur les performances cognitives et motrices à T2 (n = 33).

Nous nous intéressons ici à la comparaison des performances motrices de contrôle postural (vitesse d'oscillation du centre de pression en $mm.s^{-1}$) et cognitives d'inhibition mentale (taux d'erreurs au test de Stroop) en situation de ST et de DT. Ces deux graphiques représentent le pourcentage de différence de performance entre la situation de ST et de DT à T1 et à T2. Les unités d'axes diffèrent, mais sont rapportées aux mêmes proportions pour plus de lisibilité. Prenons l'exemple de l'un des participants testés à T1. Ce participant passe d'un taux d'erreur au Stroop de 5% en ST à un taux d'erreur de 50% en DT, correspondant à une dégradation de 900% de sa performance. Ce même participant passe d'une vitesse d'oscillation de 22.26 $mm.s^{-1}$ en ST à une vitesse d'oscillation de 15.36 $mm.s^{-1}$ en DT, correspondant à une augmentation de 31% de sa performance. La représentation de son effet de la DT à T1 selon

Licence CC BY-NC-ND 3.0

le modèle de Plummer se situe à l'intersection entre -900% en cognition (sur l'axe des abscisses) et +31% en motricité (en ordonnées).

Nous observons ici les différents motifs d'effet de la DT décrits par Plummer et al. (96), avec une dégradation ou une facilitation de l'une, l'autre ou des deux tâches suivant les sujets. Dans le cadran inférieur gauche sont représentées les situations d'ICM mutuelle délétère avec dégradation des performances cognitives et motrices. Dans le cadran supérieur droit sont représentées les situations d'ICM mutuelle facilitatrice avec amélioration des performances cognitives et motrices. Les cadrans supérieur gauche et inférieur droit représentent des situations mixtes, où la performance cognitive ou motrice est améliorée et l'autre dégradée – cette situation est appelée « compromis prioritaire » (ou *priority tradeoff*), et correspond à une situation de priorisation (93). L'exemple du participant pris précédemment correspond à une situation de compromis prioritaire (dégradation cognitive et amélioration motrice).

En comparant les effets de la DT à T1 et T2, il semble que nous assistions à un recentrage des points vers la zone de non-interférence. Toutefois, une analyse plus précise de ce phénomène nécessite une étude du déplacement des points sur ce graphique, c'est-à-dire une analyse de l'impact de l'entraînement sur l'effet de la DT. C'est l'objet du paragraphe qui suit, avec une proposition de représentation dynamique.

Impact de l'entraînement sur l'effet de la DT

Nous proposons cette fois une représentation dynamique de chacun de nos participants sur un graphique d'effet de la DT. Nous nous intéressons à la variation entre T1 et T2 des comparaisons des performances motrices de contrôle postural (vitesse d'oscillation du centre de pression en $mm.s^{-1}$) et cognitives d'inhibition mentale (taux d'erreurs au test de Stroop) en situation de ST et de DT. En d'autres termes, nous étudions l'impact de l'entraînement sur l'effet de la DT, soit les modifications de l'ICM d'un sujet après entraînement. Ceci est illustré en figure 32. Les axes sont tronqués pour plus de lisibilité, mais les unités et proportions d'axes ainsi que les points représentés sont strictement les mêmes que pour la figure 31.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

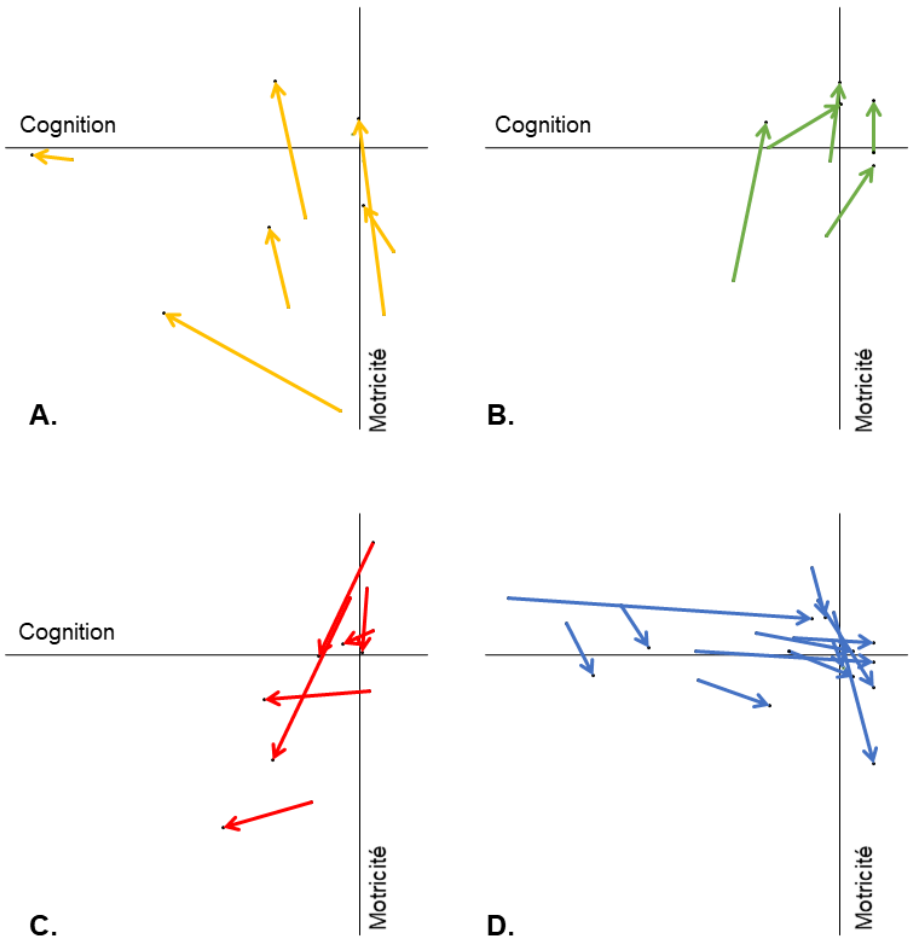


Figure 32 : Impact de l'entraînement sur l'effet de la DT – 4 types de modifications de l'ICM (A, B, C et D) (n = 33)

Nous pouvons distinguer 4 types de modifications de l'ICM à partir de ces représentations graphiques. Dans un cas, les participants présentent une diminution de l'effet de la DT tant sur leurs capacités cognitives que motrices (flèches vertes, figure 32. B.). À l'inverse, certains participants présentent une augmentation de l'effet de la DT sur leurs capacités cognitives et motrices (flèches rouges, figure 32. C.). Enfin certains présentent une diminution de l'effet de la DT sur leurs capacités cognitives concomitante à une augmentation de l'effet de la DT sur leurs capacités motrices (flèches bleues, figure 32. D.), ou inversement (flèches jaunes, figure 32.A.).

Cette représentation graphique nous permet également de constater que tous les comportements existent, représentés par des vecteurs aux normes, directions et sens variés. Ainsi, certains participants voient l'effet de la DT diminuer ou augmenter chez eux sur le plan moteur et/ou cognitif à la suite des 3 mois d'entraînement. Certains participants vont même jusqu'à changer de cadran d'ICM, passant d'une interférence facilitatrice à délétère, ou inversement. Ces transitions s'observent pour tout type de profils : des hommes comme des femmes, avec ou sans aide technique, plus ou moins âgés, présentant des performances initiales cognitives et motrices variées, dont l'ICM augmente, diminue ou est transposée.

Il est ainsi difficile d'établir des profils prédictifs, de comparer les déclins ou progrès, ou encore d'évaluer l'impact fonctionnel suivant le niveau de modification de l'ICM. Il semblerait toutefois

Licence CC BY-NC-ND 3.0

que ceux qui bénéficient le plus de l'entraînement sur l'aspect moteur en DT soient ceux qui ont été le plus impactés par la DT sur le plan moteur (figure 32. A.). À l'inverse, ceux qui bénéficient le plus de l'entraînement sur le plan cognitif en DT seraient ceux qui ont été le plus impactés par la DT sur le plan cognitif (figure 32. D.). Il semblerait enfin que la tendance d'un recentrage vers la zone de non-interférence se confirme.

7.4. Discussion

L'objectif de cette pré-étude clinique interventionnelle longitudinale était d'évaluer les effets d'un entraînement en DT utilisant comme support un *exergame* conçu et développé *ad hoc* sur les capacités cognitives, motrices et de DT de séniors, ainsi que sur leur niveau de qualité de vie, de motivation, de peur de tomber et d'activité physique. Nous souhaitions également évaluer les niveaux de sécurité, d'adhésion, de réalisation et de complétion de notre entraînement. Globalement, notre entraînement était efficace pour l'amélioration de paramètres cognitifs : la mémoire de travail en ST et l'inhibition mentale en DT. L'ensemble des autres paramètres étudiés ne présentaient pas de différence après 3 mois d'entraînement pour notre échantillon de 33 séniors. Cet entraînement semblait sûr et bien accepté. L'interprétation de ces résultats nécessite d'être discutée.

Cette discussion se décompose en plusieurs parties. Après une présentation de l'échantillon d'étude et de ses caractéristiques, nous aborderons l'efficacité de notre *exergame*, son attractivité et la période de suivi. Nous aborderons enfin les limites de cette étude, ainsi que ses perspectives.

7.4.1. Échantillon d'étude

Nos critères d'inclusion étaient d'être âgé de plus de 65 ans, ainsi que physiquement et cognitivement sains. Nos participants étaient en majorité des femmes (ratio de 2:1) avec un âge globalement compris entre 66 et 97 ans, de niveau d'éducation relativement faible (11 parmi 39 étant allés jusqu'à un niveau baccalauréat). Ces personnes étaient exemptes de pathologies diagnostiquées altérant la marche ou l'équilibre. Toutefois, la majorité présentait des troubles de la motricité et possédaient une aide technique (21 cannes simples).

Globalement, les participants à cette étude présentaient de relativement faibles performances cognitives et motrices initiales en comparaison aux valeurs normales issues de la littérature pour cette catégorie d'âge et d'éducation. Ainsi, sur le plan cognitif les participants présentaient un temps moyen de réalisation du test de Stroop supérieur à la norme de plus de 48% avec un score de 223 secondes dans notre étude contre 151 secondes habituellement (341). De même, le taux médian de bonnes réponses au test de N-Back était inférieur de 50% aux valeurs normales avec un score de 43% dans notre étude contre 87% selon une méta-analyse (342). Le temps moyen au TMT(B-A) était quant à lui supérieur de 30% aux valeurs normales avec un score de 100 secondes contre les 77 secondes habituellement (343). Sur le plan moteur, les participants présentaient un temps médian au TUG supérieur de 18% à 30% aux valeurs normales avec un score de 13 secondes dans notre étude contre les habituelles 10 à 11 secondes (344). Les scores moyens au BBS étaient inférieurs aux normes de 12% à 17% avec des valeurs de 44 contre un score compris entre 50 et 53 habituellement (344). Ces scores au TUG et au BBS indiquent dans les deux cas un faible risque de chute des participants (345,346). Ceci est en accord avec les valeurs de posturographie, plus proches

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de celles des sujets âgés non chuteurs que de séniors ayant chuté dans les 6 derniers mois (347), respectivement de 19 ± 1 et 24 ± 1 $mm.s^{-1}$ selon cette étude. Ce résultat est en conformité avec le ressenti des participants dont le score médian de 25 au FES-I correspond à la normale (348) et se traduit par une inquiétude modérée par rapport à la peur de tomber (348). Le niveau d'activité physique de notre échantillon était très faible, notamment en ce qui concerne le nombre de pas quotidien inférieur à la normale de 82% (349) (815 contre 4449 pas quotidiens) ainsi que la dépense énergétique active inférieure de près de 84% à un échantillon similaire utilisant le même matériel (350) (69 contre 427 kcal quotidiennes). Les résultats de l'EQ5D5L étaient similaires à une étude récente réalisée auprès d'un échantillon de séniors Belges (351), soit des personnes à la qualité de vie relativement bonne. À notre connaissance, il n'existe pas de valeurs de comparaison pour l'EMAPS ni pour le QAPPA utilisés auprès de séniors.

Nous n'avons recruté aucun sénior adhérent à un club sénior rattaché au centre communal d'actions sociales de la Ville de Limoges car ces clubs étaient fermés pour cause de pandémie mondiale de COVID-19.

Ainsi, notre échantillon d'étude correspondait à des séniors aux déficits cognitifs plus importants que les déficits moteurs, peu inquiets à l'idée de tomber, très faiblement actifs physiquement, mais à la qualité de vie globalement préservée. Cet état initial en deçà des valeurs normales peut s'expliquer par un recrutement à la sortie de plusieurs mois de confinements dus à la pandémie mondiale de COVID-19.

7.4.2. Efficacité de notre *exergame*

Dans cette première partie, nous nous intéresserons à l'efficacité de notre *exergame* sur les différents paramètres étudiés (cognitifs, moteurs, comportementaux, etc.). Nous détaillerons ici les paramètres impactés ou non, et proposerons des pistes explicatives pour l'efficacité ou la non-efficacité de notre jeu au regard de la littérature existante.

7.4.2.1. Capacités de DT

Chez 33 participants analysés, les 780 minutes d'entraînement médian réparties sur 12 semaines n'ont pas eu d'effet sur le contrôle postural (vitesse d'oscillation du centre de pression), mais en a eu sur la performance d'inhibition mentale (pourcentage d'erreurs au test de Stroop) en situation de DT. Ainsi, notre entraînement en DT semble avoir d'effet uniquement sur l'aspect cognitif de la DT.

Ce résultat peut s'expliquer par une charge motrice trop faible durant l'entraînement, suite à une commande et/ou une réalisation insuffisante. En premier lieu, il est possible que la combinaison des exercices cognitifs et moteurs aboutissant aux exercices de DT composant le programme d'entraînement ait été trop simple. Toutefois, nous avons conçu l'ensemble de nos exercices de sorte que la tâche cognitive soit incorporée au sein de l'exercice moteur, et non simplement ajoutée. Ainsi, suivant le modèle de Herold et al. de 2018 (104) repris par Temprado en 2021 (294), nous étions bien en situation de *moving while thinking* (tâche cognitive incorporée), et non de *thinking while moving* (tâche cognitive ajoutée). La réalisation de la tâche cognitive nécessitait bien une ou plusieurs actions motrices, comme réaliser un

Licence CC BY-NC-ND 3.0

squat sur la flèche correspondant à la consigne. De plus, le passage au niveau supérieur au fil des séances étant basé sur la réussite au niveau actuel, le fait que tous les participants ne soient pas parvenus à la fin du programme incrémental montre bien que la difficulté était suffisante pour le public cible. Le manque de difficulté motrice n'aurait donc pas pour origine la commande, mais la réalisation.

Dans une volonté initiale de non-discrimination, nous avons conçu notre jeu comme un encouragement à l'activité physique. Ainsi, nous avons plus valorisé la participation que la bonne réalisation ; ce qui est reflété par le système de points attribués au sein du jeu, récompensant la présence et la participation plus que la réussite. Il est possible que cette motricité non contrainte[21] sans correction de la part de l'animateur des exercices moteurs et avec une auto-gestion de la part des participants des temps de pause et de repos n'ait pas encouragé les participants à toujours donner le meilleur d'eux-mêmes et à se dépasser. Effectivement, il a déjà été décrit que les retours d'information sur la qualité d'exécution des tâches motrices constituent un élément clef dans l'entraînement et l'apprentissage des habiletés motrices (352) ; pour certains auteurs, ce serait même le rôle prépondérant des entraîneurs (353). Ce phénomène était probablement renforcé par un encadrement réalisé par des animateurs et non des professionnels de l'activité physique adaptée, rendant l'activité plus ludique que rigoureuse. Dans un essai contrôlé de 2017, Mouton et al. proposaient un plateau de jeu géant à des séniors, semblable dans sa conceptualisation à notre aire de jeu vidéoprojetée (215). Ce plateau de jeu était utilisé comme support à la pratique d'activité physique, encadrée par un professionnel. Leurs résultats sont une modification significative du niveau d'activité physique des personnes ainsi que de leur qualité de vie. C'est là une différence majeure entre la compliance qualitative, c'est-à-dire la bonne réalisation du contenu du programme, et la compliance quantitative appelée réalisation ou présence. Effectivement, si l'absence d'un participant à une séance donne une claire indication sur sa réalisation des exercices, l'inverse n'est pas toujours vrai : un participant peut être présent, mais ne rien faire.

Il est également possible qu'en situation de DT toujours plus complexe, les performances motrices se soient dégradées. Ceci peut s'expliquer par une stratégie de *cognition first, posture second* déjà observée chez des patients atteints de la maladie de Parkinson (354). La difficulté des exercices étant croissante au sein et au fil des séances, un moyen pour les participants de maintenir leurs performances cognitives (ex : se déplacer sur la bonne flèche) était de réduire leurs performances motrices (ex : ne faire que la moitié du mouvement de squat). Cette hypothèse est intéressante, car le comportement des participants irait alors à l'encontre de la priorisation de la tâche motrice (93) souvent choisie par les séniors sains dans une stratégie de préservation (355). Ceci serait d'autant plus pertinent au vu des performances initiales des participants, dont les déficits cognitifs étaient bien supérieurs aux déficits moteurs par rapport aux valeurs normales. Ce choix pour une « mauvaise » stratégie s'explique soit parce que les participants se sentaient suffisamment en confiance pour ne plus prioriser la tâche motrice, soit parce que nous aurions involontairement donné une priorité à la tâche cognitive durant les consignes d'exercice.

[21] L'utilisation du terme « motricité contrainte » est un abus de langage volontaire, faisant ici référence à une contrainte exercée par les retours de l'animateur et non par une gêne mécanique intentionnelle. Ce terme nous semble plus compréhensible que « motricité corrigée ».

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Il est également possible que ce résultat soit un faux négatif, c'est-à-dire que notre entraînement ait induit une progression de la posture en DT que nous ne parvenons pas à mesurer. Ceci peut s'expliquer par un test inadapté, dont la composante motrice serait trop simple. Effectivement certains auteurs considèrent le contrôle postural comme une activité motrice de charge faible, trop peu sollicitant pour être sensible à la DT (82). En parallèle, la majorité des exercices réalisés au cours de notre entraînement étaient des exercices d'équilibre dynamique en déplacement aux DT incorporées (*moving while thinking*) tandis que notre critère de jugement principal consistait en un contrôle postural statique en DT ajoutée (*thinking while moving*). De ce fait, il est possible que nous ayons évalué le transfert des gains de l'entraînement de l'équilibre dynamique vers l'équilibre statique, et que les améliorations réelles n'aient alors pas été observées ni observables. Cette notion de transfert des bénéfices a été abordée par de nombreux auteurs (184).

Une autre explication serait la non-homogénéité des performances initiales de notre échantillon d'étude, ainsi que l'hétérogénéité de progression des participants. Une possible dégradation ou facilitation du contrôle postural en DT a déjà été observée chez des patients après accident vasculaire cérébral (95) ainsi que chez des patients atteints de sclérose en plaques (356). Pour certains auteurs, une performance motrice serait améliorée lors de la réalisation d'une tâche cognitive concurrente à faible niveau attentionnel (97). Pour d'autres auteurs, la performance d'équilibre serait améliorée lors des situations de DT les plus complexes (357,358). Schäfer et Schumacher (359) ont proposé une relation en forme de U inversé entre l'efficacité du contrôle postural et les demandes cognitives simultanées, suggérant que le fait de se concentrer sur une tâche cognitive secondaire entraîne une certaine charge cognitive bénéfique aux performances cognitives. Ceci s'expliquerait par l'utilisation de secteurs neuronaux similaires lors de la réalisation de deux tâches aux domaines similaires (98), ce qui augmenterait l'efficacité du traitement cérébral de ces tâches en utilisant moins de ressources attentionnelles (84). Toutefois, ce phénomène serait très hétérogène (359), reflétant une variabilité interpersonnelle importante : certains participants voient leurs performances dégradées en situation de DT, mais d'autres améliorées (voir figure 31). Il est ainsi possible que nous ayons renforcé cette hétérogénéité en proposant à des participants aux déclins principalement cognitifs un entraînement semblant être à composante majoritairement cognitive, permettant l'allocation de plus de ressources attentionnelles sur le contrôle postural (360). En conséquence, la réponse à l'entraînement sur les capacités de DT des participants pourrait être plus ou moins importante, et la tendance générale nulle. C'est ce qui semble se dessiner avec un recentrage général de l'ICM vers la zone de non-interférence (voir figure 32).

Au vu des autres résultats tels qu'un effet majeur sur la mémoire de travail sans aucune amélioration des paramètres moteurs, et de notre échantillon d'étude aux déficits cognitifs initiaux supérieurs aux déficits moteurs, nous penchons vers un vrai négatif. Ainsi, notre entraînement en DT n'aurait globalement pas eu d'impact sur l'aspect moteur de la DT, principalement en raison d'une motricité non contrainte conduisant à une charge motrice trop faible. Ceci est en accord avec les limites des *exergames* existants actuellement proposées par Temprado en 2022 (361). Nous observons en parallèle des progrès sur l'aspect cognitif de la DT, qui correspondent à une libération d'attention selon le modèle de DT en volume, ou à une meilleure allocation de l'attention selon le modèle en temps. Ces résultats sont en accord avec la littérature. Ils sont ainsi très proches de l'étude de Hiamizu et al. de 2012 (180) dans laquelle 17 séniors âgés en moyenne de 72 ans ont reçu un entraînement en DT de 3 mois.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Cet entraînement consistait en des exercices de calculs, de recherche visuelle et de fluence verbale réalisés en même temps que des exercices d'équilibre, 2 fois par semaine durant 12 semaines. À la suite de cet entraînement, leur contrôle postural s'était dégradé en moyenne de 3% en ST et de 15% en DT (longueur du déplacement du centre de pression), tandis que leur taux de bonnes réponses au Stroop avait augmenté de 26% en DT. À l'inverse, dans l'étude de Fraser et al. de 2017 (320), 21 séniors de 72 ± 7 ans ont réalisé 45 minutes de travail aérobie (15 minutes de renforcement des membres inférieurs et 30 minutes d'exercice cardio-respiratoire sur tapis) concomitant à un travail cognitif informatisé (discrimination de chiffres et de formes), 3 fois par semaine durant 12 semaines. Ces participants voyaient leur contrôle postural s'améliorer de plus de 20% (vitesse d'oscillation médiolatérale), ainsi que leur taux de bonnes réponses au N-Back augmenter de 10%. Les interventions étant comparables en tous points si ce n'est le type d'activité motrice, ces deux études viennent appuyer le manque d'intensité d'effort moteur dans notre programme d'entraînement.

7.4.2.2. Proposition de modèle d'évolution de l'ICM

La réponse variable des capacités de DT à un entraînement en DT nous amène à la proposition d'un modèle théorique permettant d'illustrer la grande variabilité de scénarios d'évolution de l'ICM (figure 33). Ce modèle permet la représentation du déplacement de l'effet de la DT (ou *dual task effect* DTE) sur les performances cognitives et motrices, caractérisant l'évolution de l'ICM d'un individu selon l'effet de l'entraînement, voire du temps. Inspiré de celui de Plummer, ce modèle ne se limite pas à un cliché statique de nos individus, mais propose au contraire une représentation dynamique. Cette proposition théorique dépend évidemment de limites telles que la reproductibilité des mesures en ST et en DT, des stratégies préférentielles des participants, des tailles d'effets de DTE cognitifs et moteurs ainsi que leur significativité clinique. Ceci est une orientation de réflexion dont la piste devra être confirmée ou infirmée par des études futures.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

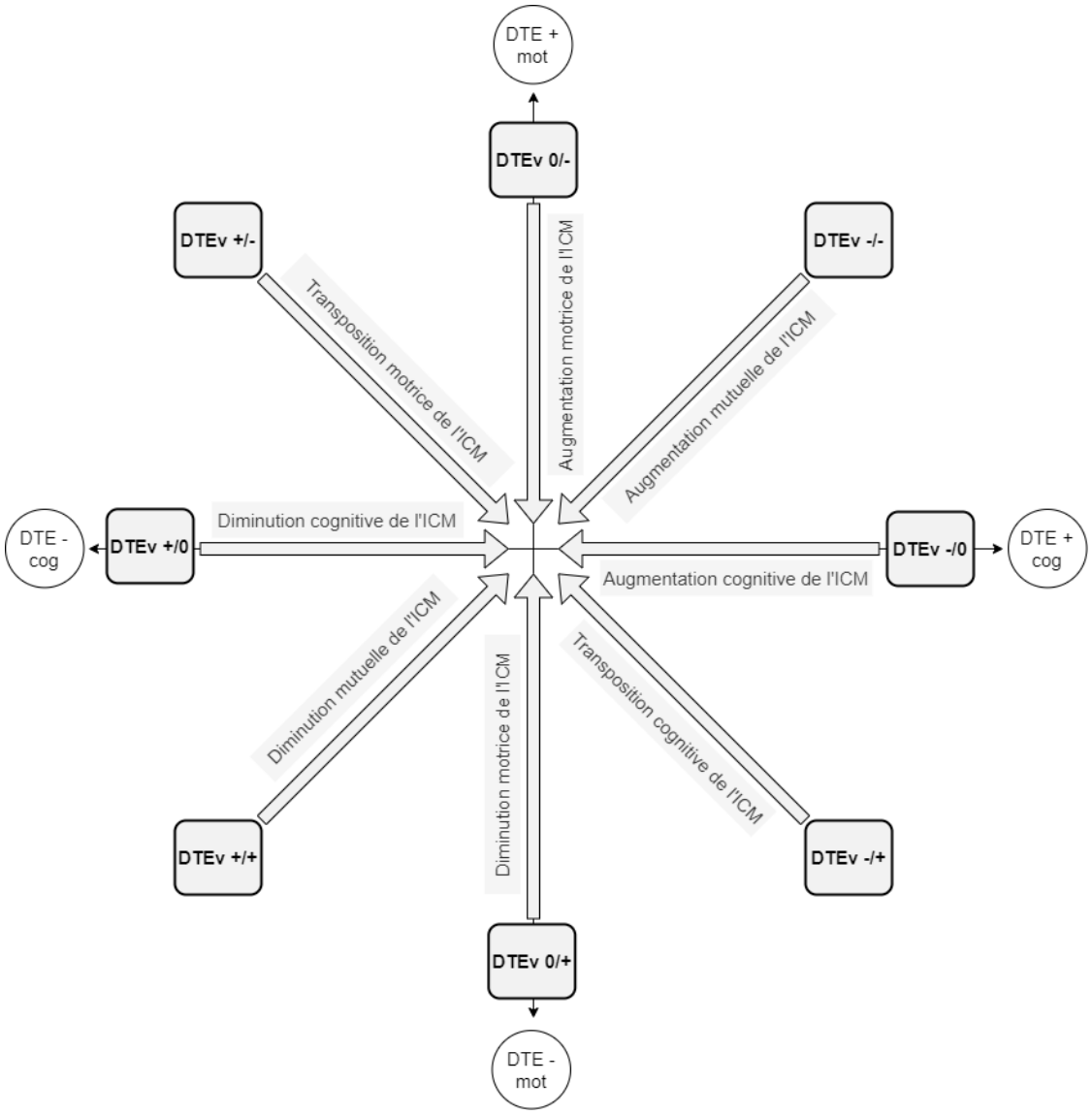


Figure 33 : Modèle de représentation de l'évolution de l'ICM, ou évolution de l'effet de la DT (DTEv cognitif / moteur)

Cog : cognitif ; DTE : *dual task effect ;* DTEv : *dual task effect evolution ;* ICM : *interférence cognitivo-motrice*, Mot : moteur.

Nous proposons ici une représentation théorique de l'évolution de l'ICM des individus après entraînement en DT. Nous illustrons donc les différents scénarios d'évolution de l'effet de la DT (DTEv). La lecture se fait de la manière suivante : après 3 mois d'entraînement, un participant peut voir l'effet de DT (ou DTE) diminuer tant sur le plan physique que sur le plan cognitif. En d'autres termes, la différence entre ses performances cognitives et motrices en DT qu'en ST sera moindre après 3 mois d'entraînement : c'est la diminution mutuelle de l'ICM. Ceci se traduit sur le graphique par une diminution mutuelle de l'ICM, ou une évolution positive de l'effet de la DT cognitif comme moteur notée DTEv +/+. Dans un autre cas, un participant peut voir son effet de la DT diminuer sur le plan moteur, mais augmenter sur le plan cognitif, correspondant à une transposition cognitive de l'ICM notée DTEv -/+.

Dans cette proposition d'illustration, nous avons choisi de représenter les déplacements strictement cognitifs et moteurs qui ne semblent pas apparaître en situation réelle (voir figure

Licence CC BY-NC-ND 3.0

32). Nous avons également choisi une orientation des flèches illustrant la tendance d'un recentrage vers la zone de non-interférence que nous pensons observer en figures 31 et 32. De plus, le modèle est ici normé et centré, mais les déplacements peuvent se faire depuis n'importe quel point de départ et vers n'importe quel point d'arrivée du diagramme. Les éléments qui importent ici sont le sens, la direction et la norme du vecteur, caractérisant l'évolution de l'ICM. Ceci peut être couplé aux positions de départ et d'arrivée de l'individu, caractérisant son ICM – l'effet de la DT (DTE) proposé par Plummer. Alors tous les scénarios de cadrans de départ et d'arrivée ainsi que d'évolution de l'ICM sont possibles comme nous l'avons observé auprès de 33 participants. Nous illustrons cette grande diversité de scénarios en figure 34.

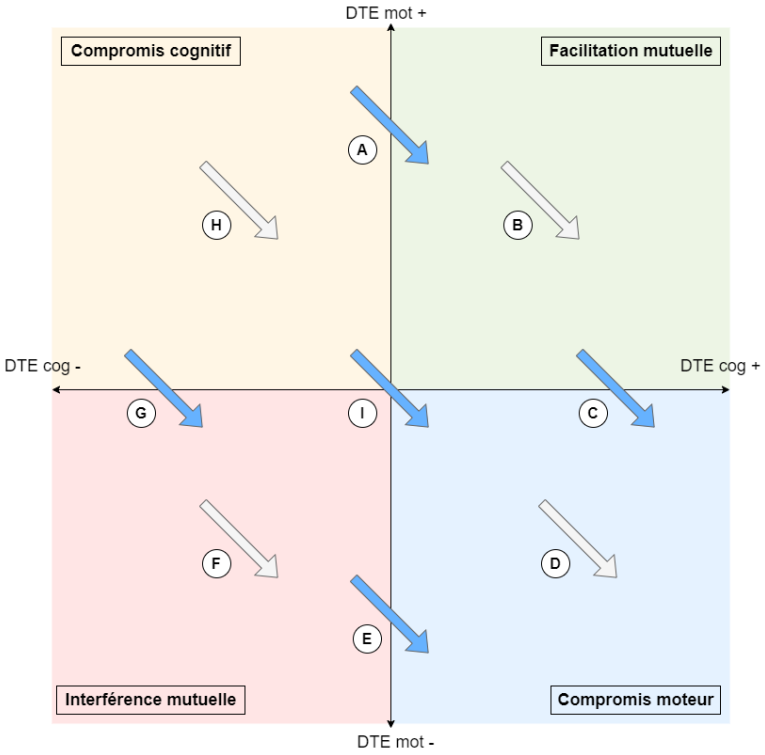


Figure 34 : Transposition motrice de l'ICM (DTEv +/-) illustrée dans tous les scénarios d'effet de DT (DTE) selon le modèle de Plummer

Dans cette figure, nous illustrons tous les cas de figure de départ et d'arrivée d'une transposition motrice de l'ICM notée DTEv +/-, correspondant à une diminution de l'effet de DT sur le plan cognitif concomitant à une augmentation de l'effet de DT sur le plan moteur. Dans un souci de lisibilité, les vecteurs sont identiques ici, mais diffèrent largement en observation réelle (voir figure 32.D.). Comme nous pouvons l'observer, une transposition motrice de l'ICM peut conduire à une modification de comportement avec changement de cadran (A, C, E, G et I), ou non (B, D, F et H).

7.4.2.3. Capacités cognitives

Notre entraînement semble avoir eu des effets bénéfiques importants sur la mémoire de travail évaluée par test de N-Back chez les 33 participants. Effectivement, ceux-ci sont passés d'un taux d'erreurs médian de 57% à 20% dont la significativité statistique est très importante. Ce résultat peut s'expliquer à la fois par le contenu de notre jeu et par l'échantillon d'étude. D'une

Licence CC BY-NC-ND 3.0

part, notre programme d'entraînement constituait potentiellement un excellent travail de la mémoire de travail, car les changements de consignes étaient constants, à la fois au fil des semaines, d'une séance à l'autre, mais également au sein d'une séance ou d'un exercice. Ceci a induit chez les participants une mise à jour constante des consignes, de leurs connaissances, et des réactions à apporter ou non à un stimulus. En plus de la flexibilité mentale nécessaire face aux nombreux changements des consignes, tout ceci nécessitait de la part des participants de constamment garder en mémoire de nouvelles consignes. D'autre part, les participants présentaient un déficit particulièrement important de la mémoire de travail. Le taux de bonnes réponses au test de N-Back visuel, habituellement de 87% ± 5% chez les séniors en moyenne selon une revue systématique (342), a été initialement mesuré à 43% dans notre échantillon. Il est possible qu'une partie de cette différence soit due aux conditions de tests, telles que la fréquence d'apparition des stimuli ou la durée du test, toutes deux très sensibles au niveau d'attention des sujets (342). Toutefois, ce déficit n'est pas étonnant au regard de la perte préférentielle de la mémoire de travail (30,31) parmi les fonctions exécutives (24,25) durant le vieillissement normal. Ceci rendrait alors notre entraînement en DT particulièrement pertinent comme outil dans la lutte contre le déclin cognitif lié au vieillissement.

En parallèle, nous n'observons aucune amélioration de l'inhibition mentale mesurée à l'aide du test de Stroop, ni de la flexibilité mentale mesurée à l'aide du TMT. Ce constat est inattendu, car ces fonctions étaient autant ciblées que la mémoire de travail dans notre jeu : de nombreux automatismes étaient construits puis contrés au fil des séances, avec des stimuli externes à ne pas prendre en compte. De plus, les valeurs initiales de nos participants en flexibilité mentale (TMT) et en inhibition mentale (Stroop) étant particulièrement faibles en comparaison des valeurs normales, le potentiel de progrès était d'autant plus important. Le manque d'effets s'expliquerait alors difficilement par un effet plafond dû à un niveau initial élevé qui ne permettrait que peu de marge de progression. Enfin, il est particulièrement surprenant de ne pas retrouver l'amélioration sur les capacités d'inhibition mentale en ST que l'on observe en DT. Une première explication possible apparaît si l'on considère ensemble les paramètres cognitifs. Il est effectivement possible que les changements fréquents de consignes entre les séances (mais également au sein des séances voire durant les exercices) n'aient pas laissé assez de temps aux participants pour leur permettre de travailler d'autres fonctions cognitives que la mémoire de travail mesurée par un outil d'analyse de mise à jour en continu (N-Back). Une seconde explication apparait à la lecture des résultats. Effectivement, l'analyse statistique de la différence du taux d'erreurs au test de Stroop en ST avant et après entraînement semble importante, mais disparait après correction par méthode de Holm-Bonferroni. Ainsi, nous pensons plus juste de parler d'un effet global de notre programme d'entraînement sur la cognition, dont les données les plus sûres après correction sont la mémoire de travail en ST et l'inhibition mentale en DT.

7.4.2.4. Capacités motrices

Sur le plan moteur, notre entraînement en DT n'a apporté aucune amélioration aux 33 participants, que ce soit sur leur équilibre mesuré par BBS, leur mobilité mesurée par TUG ou leur peur de tomber mesurée par FES-I. Ce résultat peut sembler surprenant pour un entraînement à composante motrice contenant de nombreux exercices ciblant l'équilibre et la mobilité, réalisé en continu durant 12 semaines avec une dose totale médiane conséquente (780 minutes). Toutefois, ce résultat est en lien avec la littérature à propos des entraînements

Licence CC BY-NC-ND 3.0

en DT qui utilisent des *exergames* comme support chez les séniors, dont les bénéfices cognitifs sont plus évidents que les bénéfices moteurs (184). Les explications sont similaires à celles qui concernent le manque d'effet sur l'aspect moteur de la DT. Tout d'abord, le contenu du programme d'entraînement a peut-être présenté des lacunes : quantitatives avec un manque de contrainte motrice (352) et une accumulation d'erreurs lors de la montée en difficulté de la DT, ou qualitatives avec un manque de composante aérobie et trop de travail statique (voir (320) pour des effets moteurs d'un entraînement en DT plus aérobie). C'est la différence entre entraînement physique et entraînement moteur, pointé par Temprado dans sa proposition de définition de paramètres d'efficacité des *exergames* de 2020 (294). De plus, notre échantillon d'étude partait d'un niveau moteur plus élevé que cognitif, ce qui peut expliquer des progrès moindres.

Il est toutefois important de noter que si nos participants n'ont pas progressé à la suite des 12 semaines d'entraînement, ils n'ont pas non plus régressé et demeurent à faible risque de chute et peu inquiets à l'idée de tomber selon leur score médian au TUG inférieur à 13.5 secondes (345), moyen au BBS compris entre 41 et 56 (346) et médian au FES-I compris entre 20 et 27 (348). Ce constat est particulièrement pertinent sachant que les dégradations des capacités motrices telles que l'équilibre et la mobilité sont des sources de gène dans les activités quotidiennes des séniors, mais aussi des facteurs de risques de chutes entraînant une limitation dans les participations sociales et une perte d'autonomie (63). Ainsi le maintien des capacités est déjà un succès dans un contexte gériatrique, sachant que de nombreux paramètres moteurs tels que la marche, la mobilité et l'équilibre sont des critères qui définissent le passage sous le seuil de la fragilité (362). Nous illustrons ces tendances en figure 35 par un modèle théorique aux valeurs arbitraires qui ne tient pas compte ni des cofacteurs induits par le lien entre cognition et motricité, ni de la potentielle rétention des bénéfices qui permettrait de freiner encore le déclin des capacités.

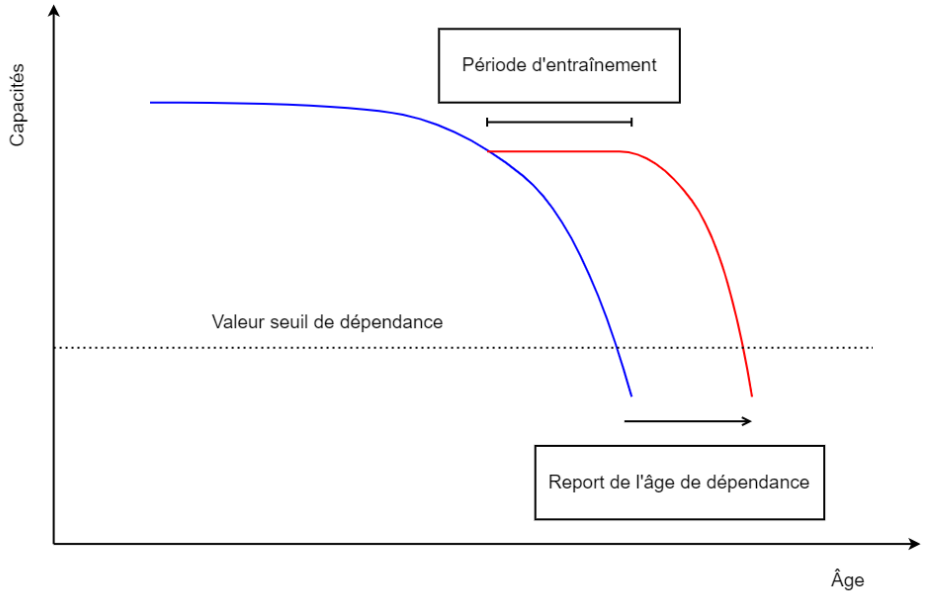


Figure 35 : Différence entre bénéfices, effets et progression dans un contexte gériatrique – inspiré du modèle « 1 + 2 + 3 » de Bouchon (213)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

7.4.2.5. Modifications de comportement

Initialement, nous pensions impacter le niveau de motivation des participants grâce à la ludicité de notre jeu et aux bénéfices potentiels ressentis. Toutefois, nous n'avons observé aucune différence après entraînement ni après intervention à propos des différents volets de la motivation. Plusieurs explications sont possibles. Tout d'abord, nous avons utilisé l'EMAPS, une échelle qui s'intéresse à la motivation pour l'activité physique à des fins de santé. Ainsi, nous ne mesurons pas la motivation générale des participants, mais leur motivation pour une activité donnée en vue d'un objectif particulier. En parallèle, nous avons présenté notre programme d'entraînement comme un moyen potentiel d'améliorations motrices et cognitives en lien avec la santé (voir la notice disponible en ligne[22]). Ainsi, il semble que nous avons recruté les résidents déjà les plus motivés à améliorer leur santé, ce qui expliquerait l'absence de gain.

Nous pensions également impacter à la fois le niveau de qualité de vie des participants, notamment leur niveau d'anxiété et de dépression grâce à la ludicité de notre jeu, et leur niveau de mobilité, d'autonomie et de participation aux activités de la vie quotidienne grâce à l'entraînement moteur inhérent à notre jeu. Toutefois, nous n'avons observé aucune différence après entraînement ni après intervention pour aucun des paramètres en lien avec la qualité de vie (EQ5D5L). Ceci peut s'expliquer par le niveau initial de qualité de vie relativement haut des participants (351), donc difficile à impacter. Il est également important de rappeler que la qualité de vie est une notion vaste constituée de nombreux déterminants, dont seul un faible nombre est interrogé via le questionnaire EQ5D5L.

Enfin, nous pensions impacter le niveau d'activité physique des participants en leur redonnant confiance en leurs capacités, voir goût à l'activité physique. Toutefois, nous n'avons observé aucune modification du niveau d'activité physique après entraînement ni après intervention, qu'il soit déclaré (QAPPA) ou mesuré (Armbands). Ceci est en lien avec l'absence de gains sur les capacités physiques (TUG, BBS et posturographie) et la peur de tomber (FES-I), et donc de potentiel regain de confiance des participants en leurs capacités. Il est possible que les capteurs utilisés aient été sensibles à la faible vitesse de marche de certains de nos participants (voir les valeurs au TUG en table 8), les podomètres portés au poignet étant connus pour être moins précis en cas de vitesse lente (363). Nous pensons toutefois que le contexte de l'étude rend l'exploitation des données de niveau d'activité physique particulièrement délicate. Effectivement, la saisonnalité avec une différence importante de niveau d'activité physique entre été et hiver, mais surtout l'impact du COVID-19 avec de nombreux confinements et couvre-feux ont probablement impacté profondément nos données, expliquant également la grande faiblesse du niveau d'activité physique des participants. De plus, il est important de garder à l'esprit que malgré certaines tendances sur la significativité statistique notamment pour les données issues de capteurs, la significativité clinique est bien différente. Effectivement, une différence de 0.01 MET médian pour la dépense énergétique active ou de 30 pas quotidiens médians ne semble pas cliniquement importante. En parallèle, les données de sorties de domicile ont été systématiquement non relevées, car il existait une incohérence importante entre les faits rapportés par les participants et la réalité observée par le personnel des établissements. Les participants disaient être sortis très fréquemment de l'établissement, et avoir visité fréquemment les points d'intérêt de la ville mis en avant dans

[22] Le lien direct vers la notice d'information est https://drive.google.com/file/d/18MUeCdI9GZ5z213VnRLqkiiQ4K5wHxHS/view?usp=sharing

Licence CC BY-NC-ND 3.0

notre jeu. Or, les personnels d'accueil ne nous rapportaient pas les mêmes informations. Nous pensons que ceci est un biais de désirabilité.

Ainsi, des bénéfices trop faibles de notre entraînement additionnés à un niveau initial trop élevé de nos participants n'ont pas permis d'observer des changements de qualité de vie ou de comportement en termes de motivation ou de niveau d'activité physique.

7.4.3. Attractivité de notre *exergame*

L'adhésion (89%), la réalisation (88%) et la complétion (87%) relatives à notre programme d'entraînement ont été particulièrement élevées en comparaison de la littérature. Habituellement, la complétion à des programmes d'intervention (à savoir le nombre de personnes n'abandonnant pas) est relativement élevée, comprise entre 65% et 86% (364), mais la réalisation est bien plus faible, comprise entre 58% et 77% (364) voire inférieure à 50% (365). En d'autres termes, les séniors n'abandonnent pas les programmes d'entraînement dans lesquels ils s'engagent, mais ne les réalisent pas pour autant. L'adhésion est plus délicate à estimer, car les études évaluent rarement le nombre de participants rapporté au nombre de personnes éligibles.

Nous pouvons expliquer ces scores élevés par différents facteurs. Le premier constituait notre postulat d'étude : appliquer les principes de ludification via notre jeu permet probablement d'augmenter la motivation des participants à participer (366). Le second est le rôle central qu'ont joués les animateurs des différents centres. En effet, les programmes d'entraînement sont connus pour bénéficier d'une meilleure adhérence lorsqu'ils sont supervisés (364). De plus, les animateurs ont été ici une véritable interface entre l'investigateur principal de chaque centre et les participants à l'étude. Ce sont eux qui ont sensibilisé les résidents à l'étude, à son contenu et aux différents bénéfices qu'ils pourraient en retirer. Enfin, ils connaissaient individuellement les résidents et étaient à même de trouver les mots justes afin de les encourager à s'engager et à poursuivre l'entraînement. Parallèlement, l'activité était proposée collectivement et directement sur le lieu de vie. Si les activités à domicile ou collectives en centres obtiennent les mêmes compliances et complétions à court terme (364,367), les activités à domicile semblent obtenir plus d'engagement d'essai (ou *have try*), tandis que les activités collectives obtiennent plus d'engagement sur le long terme (367). La combinaison des deux nous a permis de maximiser nos chances d'engagement d'essai, à court et à long terme. De plus, nous avons réalisé un recrutement en plusieurs vagues du fait de la disponibilité des animateurs et des locaux. Les retours positifs des premiers participants ainsi que le haut niveau de sécurité rassurant (0% d'évènements indésirables graves), parallèlement à un effet groupe et à un désir d'appartenance sociale, ont créé une attente et une envie de participer. Enfin, il ne faut pas sous-estimer l'impact de la pandémie de COVID-19. Les différents confinements, couvre-feux et distanciations physiques qui ont été instaurés ont grandement atteint les séniors résidents des RAMs. La proposition d'une activité (collective qui plus est) dans une période où plus aucune activité n'était proposée ne pouvait que remporter un franc succès.

Ces résultats positifs sont d'autant plus intéressants au vu des caractéristiques de notre échantillon qui présente de nombreux paramètres prédictifs négatifs pour pratique d'exercices réguliers : séniors sédentaires, inactifs, présentant un IMC élevé (169).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Attention toutefois : il est important de distinguer ici les taux d'abandons durant l'entraînement (n = 5, soit 13% de l'effectif à T1) et durant l'intervention (n = 12, soit 35% de l'effectif à T2). Bien que les raisons de ces abandons soient variées et ne représentent pas nécessairement une volonté de la part des participants, il semble exister un décalage entre l'intérêt porté au jeu et celui porté à l'étude. Ceci peut s'expliquer par une certaine lassitude pour les évaluations, renforcée par une période de coupure de 3 mois. Enfin, nous n'observons ici qu'une adhérence à court terme (3 mois). Il n'est pas exclu que notre jeu, sans variantes, soit perçu comme rébarbatif au bout de 6 ou 12 mois, et que les taux de réalisation et complétion diffèrent alors.

7.4.4. Période de suivi et effet global de l'intervention

Après 3 mois de suivi, nous n'observons aucune différence significative sur l'ensemble des paramètres entre T3 et T2 pour les 22 participants qui sont arrivés au terme du programme. Ceci signifie qu'aucune fonction cognitive, motrice ou de DT ne s'est dégradée, pas plus que la qualité de vie, la crainte de tomber, le niveau de motivation, et d'activité physique chez ces participants après 3 mois sans entraînement. Ceci signifie surtout que les gains obtenus après entraînement en termes de mémoire de travail en ST et d'inhibition mentale en situation de DT ont été maintenus. Ce résultat est surprenant au vu de la littérature chez les séniors rapportant une évolution rapide des déficits cognitifs (368), et que les gains obtenus après entraînement ne subsistent pas après 3 mois pour la cognition (369). Toutefois, dans une étude très proche de la nôtre, Eggenberger et al. obtient des résultats similaires (370). Dans cet essai contrôlé randomisé, 71 séniors de 78 ans en moyenne réalisaient 1h d'entrainement supervisé par semaine durant 12 semaines, par groupe de 5 ou 6. Ces entraînements étaient soit de la danse en DT (très proche de nos exercices de *stepper*) (n = 24), soit de la marche en DT (n = 22), soit de la marche en ST (n = 25). Tous ces types d'entraînement étaient complétés par des exercices d'aérobie, de renforcement musculaire et d'équilibre postural. Les 47 participants réalisant l'évaluation de suivi à 1 an présentent un maintien des gains concernant la flexibilité mentale (TMT), la mémoire visuelle à long terme (ou mémoire épisodique), et la vitesse de traitement. Ainsi, les modalités d'entraînements, les types de gains et la durée de rétention diffèrent légèrement de notre étude, mais les tendances sont similaires.

Concernant l'effet global de l'intervention, nous retrouvons logiquement une différence entre T1 et T3 pour la mémoire de travail en ST et d'inhibition mentale en DT, puisque celle-ci est améliorée entre T1 et T2 et maintenue entre T2 et T3. Toutefois, nous observons également une amélioration des capacités d'inhibition mentale avec un temps moyen de réalisation du test de Stroop réduit de 11% (passant de 223 ± 79 à 198 ± 69 secondes), ainsi qu'une amélioration des capacités d'équilibre dynamique avec un score moyen au BBS augmenté de 9% (passant de 44.3 ± 8.2 à 48.2 ± 5.5), alors même que ces différences n'apparaissent pas après entraînement. Nous observons ceci également dans l'étude de Eggenberger et al. (370) dont les participants présentent une amélioration du score au TMT qui se poursuit à six mois et un an de suivi ; ces auteurs parlent d'une réponse différée à l'intervention.

Le maintien des gains obtenus après entraînement et la non-dégradation de toutes les fonctions étudiées à 3 mois de distance mais surtout l'apparition de nouveaux gains non observés suite à l'entraînement trouvent probablement leur explication dans le taux d'abandon à T3. Le taux d'abandons à T2 était de 13% (5 sortis d'étude), tandis que celui à T3 était de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

35% (12 sortis d'étude). Les raisons de ces abandons lors de la période de suivi étaient des refus de l'évaluation finale, des accidents (COVID-19 ou hospitalisation) et un décès. Tout ceci laisse à penser que les participants qui ne se sont pas présentés à l'évaluation de suivi sont probablement les participants les plus fragiles. Ainsi, les 22 participants restants à T3 auraient été les plus robustes, présentant les meilleurs scores aux évaluations.

Au vu de ces éléments, nous considérons que le maintien des gains de l'entraînement après 3 mois de suivi est potentiellement un vrai positif, mais que l'apparition de nouveaux gains est un biais d'attrition.

7.4.5. Limites

Nous avons vu que notre *exergame* semblait bien accepté, et qu'il présentait une efficacité globale sur la cognition, particulièrement robuste en ce qui concerne la mémoire de travail en ST et l'inhibition mentale en DT. Ces bénéfices sont maintenus à 3 mois. Il est important de lire ces résultats au regard des limites de notre étude.

La première limite de notre étude résulte de l'absence de groupe contrôle. S'il est rare que les capacités augmentent spontanément chez les séniors en l'absence de toute intervention, il est tout de même difficile de conclure quant aux bénéfices de notre entraînement. Nous pouvons parler d'une suspicion d'efficacité, mais pas d'une preuve en l'absence de supériorité à un groupe contrôle inactif. L'absence de groupe contrôle nous empêche également de confirmer notre réduction du déclin selon le modèle inspiré du « 1 + 2 + 3 » de Bouchon (213). L'absence de groupe contrôle nous empêche enfin de conclure sur les effets à long terme de l'entraînement (comparaison à T3 entre un groupe entraîné et un groupe non entraîné) ; nous n'avons ici qu'un indicateur des effets de l'entraînement puis de son arrêt (comparaison à T1, T2 et T3).

Toutes les observations que nous avons faites sont difficilement extrapolables au vu de la taille relativement faible de notre échantillon d'étude. De plus, il est difficile de qualifier notre échantillon en l'absence de valeur seuil (ou *cut-off*) lors de l'inclusion via une évaluation de la cognition globale telle que le *mini-mental state examination* ou le *Montreal cognitive assessment*. Ceci est amenuisé par une évaluation de nombreuses fonctions notamment exécutives lors de l'évaluation à T1, mais surtout par l'obligation des résidents de présenter un score supérieur ou égal à 5 sur la grille AGGIR (Autonomie Gérontologie Groupes Iso-Ressources) afin de pouvoir demeurer au sein des RAMs. Cette grille permet de qualifier le niveau d'autonomie d'une personne sur une échelle de 1 à 6, le niveau 5 correspondant à une autonomie mentale totale, la personne ayant besoin seulement d'une aide ponctuelle pour la toilette, la préparation des repas et le ménage (371). *In fine*, notre échantillon d'étude semble relativement représentatif de la population générale : la proportion d'hommes serait de 37% chez les séniors de 85 ans en France selon l'INSEE, et les valeurs moyennes de taille, poids et IMC très proches de celles que nous observons selon une étude épidémiologique menée auprès de 450 séniors de plus de 66 ans en Suède (372). La spécificité de notre échantillon serait leur niveau cognitif et d'activité physique particulièrement bas.

Une autre limite à notre étude concerne la dose d'exposition à l'entraînement des participants. Ces derniers réalisaient en moyenne 23 séances sur les 26 proposées, soit 88% de réalisation de l'entraînement proposé. Comme nous l'avons vu, ce résultat est relativement élevé.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Toutefois, ceci correspond seulement à 77% des 30 séances initialement prévues. Le fait que ces 30 séances n'aient jamais été atteintes par aucun groupe s'explique par la différence entre l'idéal scientifique et la réalité de terrain : impératifs de disponibilité des locaux, des animateurs et des participants, pas toujours compatibles avec les espaces de vie commune et de pandémie de COVID-19. Ces contraintes ont pu contribuer à la trop faible dose d'entraînement physique nécessaire pour induire des bénéfices.

Le taux d'abandons important à T3 a entraîné un possible biais d'attrition, mais également une adaptation du plan statistique. Nous souhaitions initialement réaliser une ANOVA à mesures répétées pour la comparaison des différences entre l'effet de l'entraînement (T1-T2), du suivi (T2-T3) et global (T1-T3). Toutefois, nous souhaitions réaliser une analyse *per protocol* fondée sur les données disponibles. Face au nombre important de données manquantes à T3, et afin d'atteindre le nombre de sujets nécessaires préalablement calculé à T2 (N = 32), nous avons opté pour des comparaisons distinctes répétées. Ceci est compensé par une correction du risque d'erreur par méthode Holm-Bonferroni.

Une dernière limite à notre étude concerne la différence d'évaluation de l'inhibition mentale par le test de Stroop en ST et en DT. Parcourir l'intégralité de la grille de test de Stroop (soit 100 éléments) demandait aux participants plus de 200 secondes en moyenne. L'analyse posturographique de la vitesse de déplacement du centre de pression ne durant que 30 secondes, les participants ne pouvaient pas parcourir l'intégralité de la grille de test en situation de DT. Le nombre moyen de réponses était de 19.6 ± 7.9 à T1 pour 38 participants par exemple. Toutefois, la sensibilité des erreurs au test de Stroop à sa durée n'est pas toujours observée (373), voire tout à fait discutée (374). En parallèle, la grille d'inhibition peut être plus simple à distance pour des séniors majoritairement myopes donc plus enclins à distinguer une couleur qu'à lire un texte. Toutefois, les taux d'erreurs aux tests de Stroop ne semblent pas différer grandement entre ST et DT, ce qui peut s'expliquer par une difficulté moindre sur le plan cognitif en DT compensée par la charge induite par le contrôle postural.

7.4.6. Perspectives

Les perspectives de cette étude pilote exploratoire sont doubles, avec un volet en recherche et un volet de « pratique clinique ».

Concernant la recherche, il serait intéressant d'explorer les conséquences motrices qui pourraient être obtenues en cas de motricité contrainte avec une correction de la qualité des exercices et une gestion calibrée des temps de pause. En ce sens, la mesure indirecte de l'intensité des séances lors de l'entraînement via la mesure de la FC ou via des capteurs de dépense énergétique type Armbands serait pertinente. Il serait de plus intéressant de réaliser une analyse statistique en partitionnement de données (ou *cluster analysis*) afin de définir des caractéristiques communes aux participants selon leurs comportements. Ces analyses permettraient de valider ou d'invalider certaines tendances, telles que le niveau d'effet de la DT ou l'impact de l'entraînement sur cet effet suivant les niveaux cognitifs ou moteurs initiaux, mais aussi selon l'âge, le niveau d'éducation ou l'utilisation d'une aide technique par exemple. Toutes ces informations pourraient s'ajouter à celles que nous avons obtenues pour constituer un socle théorique contribuant à la réalisation d'un futur essai clinique contrôlé randomisé. Nos résultats permettent de définir certains aspects de ce futur essai. Ainsi, nous devrions maintenir le niveau de sollicitation cognitif, tout en proposant une activité physique plus intense type aérobie monitorée par cardiofréquencemètres, ainsi qu'une motricité contrainte.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Concernant les critères de jugement, nous devrions uniquement maintenir les paramètres cognitifs, moteurs et de DT ainsi que l'activité physique.

Concernant la « pratique clinique », la preuve de concept que constitue cette étude doit nous encourager à perfectionner le dispositif et à l'adapter pour le proposer à d'autres populations. Tout ceci est facilité par l'approche que nous avons eue, avec un développement logiciel interne. Propriétaires du code source du jeu, nous pouvons aisément le compléter avec de nombreuses fonctions et variations, tout en en améliorant l'interface graphique et l'expérience utilisateur (participants comme animateurs). Notre analyse de la littérature existante nous apprend ainsi que les séniors atteints de troubles cognitifs légers (ou *mild cognitive impairements*) bénéficient grandement des entraînements en DT (375), et que les dispositifs d'*exergames* proposés à domicile sont efficaces chez des participants atteints de neuropathies : accidents cardiovasculaires (376), sclérose en plaques (377) ou encore maladie de Parkinson (378). Il serait alors pertinent de proposer notre *exergame* dans d'autres établissements municipaux tels que des maisons de retraite où résident ce type de population. Ceci est d'autant plus simple au vu des forces de notre dispositif particulièrement souple d'usage, sûr, adaptable et pour lequel les animateurs sont formés. D'autres auteurs vont en ce sens ; nous pouvons citer l'étude de Amiri et al. publiée récemment (379) proposant un programme d'entraînement en DT utilisant pour support un dispositif au concept proche du notre à des patients atteints de sclérose en plaques, illustré en figure 35.

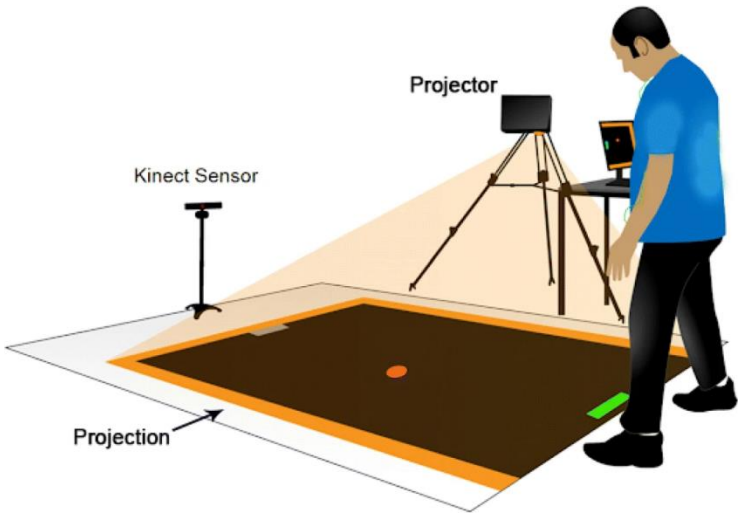


Figure 36 : Exemple d'*exergame* au concept proche du notre utilisé chez une autre population (379)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé de la Partie 7

Dans cette étude, nous avons recruté 39 séniors d'une moyenne d'âge de 85 ans présentant des déficits moteurs, mais surtout cognitifs importants, très faiblement actifs mais à la qualité de vie préservée. Nous leur avons proposé un entraînement en DT utilisant notre *exergame* comme support à raison de 30 minutes d'exercices 2 à 3 fois par semaines durant 12 semaines. Cet entraînement a rencontré un relatif succès avec des taux élevés d'adhésion (89%), de réalisation (88%) et de complétion (87%). Nous n'avons observé aucun évènement indésirable grave durant les 286 séances proposées, soit 8580 minutes d'entraînement. Cet entraînement a apporté une amélioration des capacités cognitives chez les participants avec une augmentation des performances de mémoire de travail en ST de 65% et de l'inhibition mentale en DT de 37% (sans dégradation de la performance motrice concomitante). En parallèle, nous n'avons observé aucune différence sur l'inhibition et la flexibilité mentale (en ST), sur l'équilibre postural, la mobilité et la peur de tomber ni sur le niveau de qualité de vie, de motivation et d'activité physique. Ces paramètres sont donc maintenus ; dans le cadre du vieillissement, freiner un déclin immuable constitue un résultat pertinent.

Ainsi, notre *exergame* semble particulièrement pertinent pour l'entraînement cognitif et le maintien physique des séniors, en lien avec la littérature existante sur les *exergames*. Notre approche multi-domaines (cognitifs comme moteurs) semble pertinente. Tous ces résultats sont à interpréter au regard des nombreuses limites méthodologiques de l'étude telles que l'absence de groupe contrôle ou la taille relativement faible de l'effectif, dans un contexte sanitaire délicat.

Ce premier travail exploratoire répond à un certain nombre de questions issues de la littérature des *exergames* sur-mesure (efficacité, nécessité de supervision, niveau de risque et d'adhésion, utilisabilité à domicile, niveau d'adhésion) et ouvre la voie à d'autres travaux à la méthodologie renforcée, dans d'autres contextes ou auprès d'autres populations. Ce travail nous a également permis de proposer un modèle de représentation de l'évolution de l'ICM traduisant l'évolution de l'effet de la DT au cours du temps, notée DTEv.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

8. Étude qualitative 1 : Retour d'expérience des participants

Dans cette partie, nous détaillons comment avons-nous recueilli le retour d'expérience des participants à notre *exergame*, et ce que nous en apprenons.

Les résultats de cette étude qualitative ont fait l'objet d'une publication francophone (299) dont le manuscrit est présenté en annexe 4.

Article 4 : Gallou-Guyot M., Perrochon A., Thomas F., Mandigout S. (2021). Réentrainer les séniors à faire deux choses à la fois : le projet INCOME. Revue TraHs n°11.

8.1. Objectifs

L'efficacité d'un programme d'entraînement dépend de son acceptation par les sujets concernés ; ceci est vrai tant pour les entraînements cognitifs (133) que moteurs (166). L'objectif de cette enquête qualitative auprès des participants au programme d'entraînement était de recueillir leurs témoignages afin de constituer un retour d'expérience sur notre jeu, son utilisation, sa compréhension, et son appréciation. Ce retour qualitatif vient compléter les données quantitatives relevées d'adhésion, de réalisation et de complétion.

Dans cette partie, nous détaillerons la méthode d'étude ainsi que les résultats obtenus.

8.2. Méthode

8.2.1. Participants

Nous avons sollicité 24 participants à notre programme d'entraînement répartis en 6 groupes : 5 groupes à la suite de leur première séance de jeu, et un groupe à la suite de leur troisième séance de jeu. Ceci nous permettait de recueillir des retours d'expérience dits « de découverte » ainsi que d'autres dits « d'habitude ».

8.2.2. Procédure

L'expérimentation était basée sur des entretiens semi-directifs dont la préparation, la conduite et la retranscription étaient assurées par une docteure en sociologie (380). Les entretiens d'une heure étaient réalisés à la suite des séances d'entraînement, dans la salle de jeu, sans intrusion de personne extérieure. L'ensemble des consignes et l'objectif de cet entretien étaient présentés aux participants. Durant une heure, les participants d'un même groupe exprimaient leur ressenti sur le jeu, tant sur les exercices réalisés que sur les consignes fournies ou sur l'outil technologique utilisé. Les participants pouvaient aborder les thèmes qu'ils souhaitaient, dans l'ordre qu'ils souhaitaient, avec le ton et l'appréciation qu'ils souhaitaient. L'expérimentateur s'assurait que l'ensemble des items définis au préalable au sein du guide d'entretien étaient abordés au cours de la discussion. Ces items incluaient par exemple l'impression de s'être entraîné, la première impression, la sensation d'effort physique ou cognitif, la notion de plaisir et d'immersion, la facilité ou complexité d'utilisation, etc. L'expérimentateur reformulait les questions ainsi que les réponses afin d'aider l'expression et d'assurer la bonne compréhension. L'ensemble était enregistré afin de retranscrire le texte.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

8.2.3. Analyse

La méthodologie d'analyse employée était une analyse de contenu basée sur l'exploitation de la transcription des expressions, des thèmes abordés et des verbatim employés (380).

8.3. Résultats

L'adhésion des personnes à notre jeu était considérée comme un objectif important à atteindre. La question était d'identifier les actions favorisant l'adhésion des participants au jeu, dans la durée. Ici la fréquence d'usage était particulièrement importante dans un contexte de suivi de programme d'entraînement longitudinal.

8.3.1. L'esthétique au second plan

À la suite de nos observations, nous avons noté que l'adhésion ne trouvait pas sa source dans l'esthétique du jeu en lui-même. Les participants réagissaient parfois en estimant que *« c'est beau », « c'est magique »*, parce que la projection au sol du tapis de jeu était attirante en elle-même, ludique, proche d'un effet de découverte. Personne ne réagissait aux graphismes en tant que tels, ni en positif, ni en négatif.

Le déploiement du jeu semblait prendre sens dans un lieu, un temps et un espace donné. Les personnes intégraient l'*exergame* à leur lieu collectif de vie, par l'intermédiaire de l'animateur de leur résidence. Elles étaient très attentives à ce que les séances ne viennent pas perturber leurs habitudes de vies (horaires de repas, rendez-vous, etc.). Enfin, les personnes interagissaient dans un espace dédié durant toute la séance - le plateau de jeu. Au cœur de cet espace pouvaient se jouer des jeux psychologiques et sociaux qui dépassaient le seul cadre effectif du jeu. Les observations réalisées permettent de repérer quelques-uns de ces jeux annexes qui ont sans doute contribué au maintien de l'activité des participants dans le temps, avec les scores élevés d'adhésion (89%), de réalisation (88%) et de complétion (87%).

8.3.2. La place centrale des animateurs

Pour les personnes qui avaient soif de stimulation, la première fonction du jeu a été celle de la réduction de l'ennui. Une majorité des participants évoquaient la pandémie de COVID-19 en séance, le besoin de faire autre chose, de retrouver des activités *(« ça redonne du mouvement à la résidence »*). L'animateur, qui symbolisait par sa position sociale la possibilité d'accéder à la stimulation recherchée était en cela tout à fait important dans les moments de jeu. Les personnes ne venaient pas pour interagir avec l'*exergame*, parfois un peu avec les autres participants, mais surtout pour interagir avec l'animateur vers lequel toutes les interrogations et tous les échanges étaient tournés. La majorité des interactions observées semblaient évoquer une complicité entre les animateurs et les participants, inscrivant ainsi le jeu dans l'histoire d'une relation déjà constituée et ouvrant toutes les perspectives au maintien de l'activité, qui peut être utilisée pour entretenir la relation avec l'animateur. Des phrases d'animateur comme *« Je vous ai manqué non ? »* ou *« Vous viendrez bien me voir jeudi prochain ? »* évoquent le maintien du lien.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chaque moment de jeu basé sur l'*exergame* était ainsi une nouvelle séquence relationnelle, impliquant l'enjeu de connaître, de reconnaître, et d'être reconnu. Les personnes apprenaient à connaître le jeu ; mais également à connaître leurs capacités physiques et cognitives, et à les reconnaître par elles-mêmes (besoin ou non d'une chaise, d'une canne, de leur fatigue, etc.). C'était également un temps de reconnaissance accordée à leur personne *(« Ah c'est bien de voir des jeunes, c'est bien de prendre soin de nous »)*. L'animateur était le pilier central de cette fonction particulière du jeu : « *c'est bien, Mme X, c'est bien ce que vous faites ».* L'animateur était aussi un garant de sécurité d'un point de vue physique (*« prenez votre canne »*, *« tenez-vous au mur »*), mais surtout un garant de reconnaissance. *(« Je savais bien danser, mais ça devient difficile ; Vous allez voir Mme X, vous allez y arriver de nouveau ; ah si vous le dites (rire) »*).

8.3.3. L'interface et les temps morts

De nombreuses personnes profitaient des temps de mise en route du jeu puis de fin de jeu pour déposer des angoisses de mort, de perte d'autonomie, de perte de capacités, ou encore un regain d'amertume. Il est intéressant de noter que le temps du jeu lui-même ne laissait que peu de place à ces formes de ruminations négatives, afin de permettre des échanges tournés vers le maintien de l'identité sociale et la conversation menant à se rapprocher des autres. *(« Faut te rappeler de ta couleur, X !»*).

L'espace-temps du jeu amenait les personnes à évoquer des souvenirs anciens, structures de leur identité sociale, notamment celles et ceux ayant vécu à Limoges. Parallèlement, le contenu du jeu permettait une valorisation de certaines capacités (notamment de calcul mental) ou d'encouragement de l'autre *(« vous voyez bien que vous y arrivez ! »*). Certaines personnes venaient même chercher dans l'interaction une réassurance : *« ça ne doit pas être terrible, si ? ; C'est parfait Mme X ; continuez comme ça. »*. Concernant les photos évoquant la ville de Limoges, les humains sur les photos étaient fréquemment plus relevés que les lieux eux-mêmes qui semblaient accessoires. Pour autant, des séances de réminiscences très positives se greffaient involontairement au jeu par l'évocation de la ville de Limoges (*« J'emmenai mes enfants fréquemment, je m'en souviens bien »*). Les réminiscences mobilisées étaient de type intégratif, avec le vécu rappelé en tant que composant fondamental de l'identité de la personne.

8.3.4. À l'usage

Les participants jugeaient le jeu facile d'utilisation, avec un apprentissage accessible (*« bien plus que ce que je n'aurais imaginé »*). L'apprentissage a petit à petit laissé place à l'amusement : *« On a travaillé, oui, mais agréablement, c'est plus qu'un jeu. »*. Les participants sentaient bien en fin de séance qu'ils avaient travaillé, ils sentaient au fil des séances qu'ils progressaient, mais pas qu'ils s'exerçaient durant la séance.

Un point de vigilance a été noté lors des observations : le jeu doit continuer à encourager les personnes. En effet, s'il venait à véhiculer uniquement des éléments de dépréciation de soi, les personnes pourraient en ce cas ne pas poursuivre. Tout l'enjeu réside bien dans le relationnel, ce qui fait de notre jeu un médiateur particulièrement intéressant entre l'animateur et les joueurs, laissant la technologie à sa juste place : en tant que support uniquement. La convivialité amenée par ce type de support est intéressante. Pour l'heure, chaque fin de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

séance était marquée par la question *« quand est-ce qu'on revient ? »*, plutôt de bon augure pour la suite.

Résumé de la Partie 8

Cette enquête qualitative par entretiens semi-directifs réalisés auprès de 24 participants au programme d'entraînement nous apprend qu'à la fois l'esthétique du jeu et son iconographie reposant sur le patrimoine culturel de la ville de Limoges ne sont pas si importantes que selon notre hypothèse, si ce n'est pour les réminiscences intégratives positives observées. Les plus-values principales de l'*exergame* sont autres. Premièrement, l'aspect jeu : l'*exergame* a été véritablement vécu comme tel par les participants qui ne se sentaient pas s'exercer, mais seulement jouer. Ceci a permis aux participants de reprendre confiance en eux et constater leurs propres capacités cognitives comme motrices, sans avoir l'impression de travailler. Ensuite, les simplicités d'apprentissage et d'utilisation rapportées par les participants, ainsi que l'accessibilité du programme respectant les emplois du temps de chacun, et intégré directement sur le lieu de vie, ont facilité l'adhésion des participants. Enfin, la place des animateurs, à la fois rassurants, encourageants, mais surtout conduisant les séances a été reconnue comme centrale et primordiale. Tout ceci nous rappelle que les technologies utilisées auprès de séniors ne sont rien sans services associés. Nous ne sommes pas en mesure de dire si cette adhésion correspond à un effet découverte, ou si elle pourrait être maintenue à long terme.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

9. Étude qualitative 2 : Retour d'expérience des animateurs

Dans cette partie, nous détaillons comment avons-nous recueilli le retour d'expérience des animateurs de notre *exergame*, et ce que nous en apprenons.

9.1. Objectifs

Le rôle des entraînements est prépondérant pour l'efficacité des programmes d'entraînement ; ce serait même pour certains auteurs le rôle prépondérant des entraîneurs (353). Il est donc important que les entraîneurs adhèrent au programme qu'ils dispensent, qu'ils en apprécient les modalités et en comprennent l'utilité. L'objectif de cette enquête qualitative auprès des animateurs était de recueillir leurs témoignages afin de constituer un retour d'expérience sur l'encadrement du programme d'entraînement et sur l'utilisation de l'outil technologique que représentait l'*exergame*.

Dans cette partie, nous détaillerons la méthode d'étude ainsi que les résultats obtenus.

9.2. Méthode

9.2.1. Participants et procédure

Nous avons sollicité 2 animateurs parmi les 3 impliqués dans le projet INCOME. L'expérimentation était basée sur des entretiens semi-directifs dont la préparation, la conduite et la retranscription étaient assurées par une docteure en sociologie (380). Un entretien commun d'une heure et demie a été réalisé après plus de 3 mois d'utilisation de l'*exergame* par les animateurs, dans un bureau sans intrusion extérieure. L'ensemble des consignes et l'objectif de cet entretien étaient présentés aux animateurs. Durant l'entretien, les animateurs exprimaient leur ressenti sur le programme d'entraînement, tant sur l'outil technologique que l'animation des séances, les consignes à donner, la surveillance des participants, etc. Les animateurs pouvaient aborder les thèmes qu'ils souhaitaient, dans l'ordre qu'ils souhaitaient, avec le ton et l'appréciation qu'ils souhaitaient. L'expérimentateur s'assurait que l'ensemble des items définis au préalable au sein du guide d'entretien étaient abordés au cours de la discussion. Ces items incluaient par exemple le ressenti sur l'utilisation de l'outil, sa complexité ou sa facilité, le ressenti sur son utilité et son efficacité, etc. L'expérimentateur reformulait les questions ainsi que les réponses afin d'aider l'expression et d'assurer la bonne compréhension. L'ensemble était enregistré afin de pouvoir retranscrire le texte.

9.2.2. Analyse

La méthodologie d'analyse employée était une analyse de contenu basée sur l'exploitation de la transcription des expressions, des thèmes abordés et des verbatim employés (380).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

9.3. Résultats

Nous présentons ici la synthèse de ce qui a été rapporté par les animateurs lors de l'entretien. Ainsi, certaines citations sont des dires de participants rapportés par les animateurs, quand d'autres sont empruntées directement aux animateurs.

9.3.1. Accueil par les résidents selon les animateurs

Le jeu, décrit par les animateurs comme *« simple en apparence, mais élaboré dans le fond »*, a reçu un excellent accueil de la part de tous les acteurs concernés.

Concernant les résidents, les animateurs ont observé globalement peu d'abandons et d'absences aux séances, ce qui est en lien avec les taux de réalisation (88%) et de complétion (87%) que nous avons mesurés. Chaque semaine, les résidents avaient hâte de découvrir les nouveautés de la semaine dans le programme (*« Qu'est-ce que nous a encore prévu Matthieu cette semaine ? »*), et ne voulaient pas que les séances ni le programme s'arrêtent. Volontaires lors des séances, les résidents exprimaient le constat de leurs progrès aux animateurs : abandon d'une canne grâce à la présence rassurante de l'animateur, réduction de l'essoufflement à l'effort, mais aussi meilleur moral. Ceci corrobore la notion de connaissance et de reconnaissance de soi. Durant les séances, il n'y avait aucune moquerie malgré des différences de niveaux, mais plutôt une entraide et une compétition seine. Les animateurs rapportent effectivement une cohésion forte au sein des groupes (*« Mais si, tu vas y arriver ! »* ou « *Souviens-toi, la consigne c'est (…) »*, par exemple). Les notions d'effet groupe et de sentiment d'appartenance, couplés à la non-discrimination constitutive des fondements du jeu s'expriment ici.

Selon les animateurs, ces constats peuvent s'expliquer par la perception du programme d'entraînement comme d'un véritable jeu. Effectivement, les participants étaient toujours surpris à la fin des 30 minutes d'une séance, comme si cette parenthèse dans le temps leur permettait d'oublier le reste (*« Ah, c'est déjà fini ? On ne voit pas le temps passer »*). Rapidement, ils n'étaient plus concentrés sur leur performance, mais ils passaient un moment convivial. Ce jeu a également permis aux animateurs de faire le lien avec d'autres animations, les résidents demandant de reprendre certains exercices spécifiques durant d'autres activités. Les exercices de mémoire de travail pouvaient par exemple être repris lors des ateliers mémoire, *« à la demande des participants ! »*. Ceci a créé de l'engouement pour le jeu parmi les résidents qui n'étaient pas éligibles à l'étude. Malgré des approches différentes de l'animation ainsi que des publics distincts entre les établissements, il est important de noter qu'il ne semblait pas y avoir de différence notable dans l'accueil reçu. Qu'une salle soit dédiée à l'animation ou non, que les résidents soient plus âgés ou résident dans la RAM depuis longtemps ou non, tous ont apprécié jouer.

Tous ces éléments rapportés par les animateurs viennent confirmer nos observations précédentes obtenues par enquête qualitative auprès des participants ou par données de présence lors des séances. Si cette information semble redondante, elle est particulièrement pertinente dans la bouche des animateurs. Effectivement, ce sentiment d'utilité qui transparait de leur ressenti est tout à fait important dans leur exercice d'animation.

Si le fait que le jeu ait été proposé dans le cadre d'une étude clinique a pu impressionner certains résidents, les freinant dans leur engagement, ce cadre a rassuré les animateurs, leur

Licence CC BY-NC-ND 3.0

garantissait un protocole sérieux et clair, ainsi qu'une assurance concernant les possibles chutes.

9.3.2. Retour d'expérience sur l'utilisation du dispositif par les animateurs

En début de projet, les animateurs étaient inquiets à l'idée de prendre en main l'outil, d'encadrer et d'animer les séances, de surveiller les risques de chutes tout en donnant les bonnes consignes et en corrigeant les joueurs. L'inquiétude se manifestait par des déclarations préliminaires spontanées : *« Houlà, ça semble compliqué ton truc »* ou bien *« tu sais, je ne suis pas coach de sport »*. Ils rapportent d'eux-mêmes cette appréhension initiale lors de l'entretien. Toutefois, ils ont estimé que la prise en main et l'apprentissage de l'outil étaient très faciles : l'installation du matériel et le protocole d'animation étaient écrits, guidés, cadrés, et les formations en amont à l'installation de l'outil et à l'animation étaient suffisantes. Puis l'appropriation du protocole se fait naturellement. *« Au final, c'était très simple et très clair, avec toute la documentation fournie (…) on ne s'est jamais sentis abandonnés »*. Les animateurs rapportaient également une certaine inquiétude en début de protocole concernant de potentielles chutes des participants. Toutefois, aucun évènement indésirable grave ne s'est produit durant l'expérimentation, malgré une moyenne de 26 séances proposées à 11 groupes, soit 286 séances réalisées correspondant à 8580 minutes d'activité ; un soulagement pour les animateurs.

Le ressenti là propos de l'efficacité était lui aussi positif, avec des constats comme l'abandon de canne ou de déambulateur de certains participants. Les animateurs se disent *« convaincus par ce jeu comme support d'animation rimant avec autonomie »*, apportant de la technologie à des résidents qui peuvent en être éloignés.

L'utilisabilité du dispositif a varié selon la résidence. Ainsi, dans un centre le dispositif était fixe, préinstallé dans une salle fermée. Ceci permettait de se concentrer pleinement sur l'activité, sans se soucier des va-et-vient ou des plannings ; en bref, le dispositif s'intégrait parfaitement dans le cadre de travail. L'animatrice rapporte que *« c'était beaucoup plus simple et rassurant pour moi, je n'aurai pas aimé avoir à toujours tout déplacer, et j'aurais eu peur de casser le matériel »*. À l'inverse, dans un autre centre le dispositif était mobile, car il était installé dans un espace partagé, ouvert, avec du bruit et du passage. Ceci entraînait une déconcentration des résidents qui se sentaient observés, et étaient parfois interrompus. Ces perturbations entraînaient également une fatigue pour l'animateur, qui devait gérer les demandes externes tout en animant et en surveillant les séances. Enfin, l'installation et la désinstallation nécessaires à chaque séance (sortir le matériel, déplacer les tables, etc.) demandaient du temps, et entraînaient surtout des risques de mauvais réglages et de fragilisation du dispositif *« ce n'est pas le temps que ça me prend, mais le fait de répéter l'opération tous les jours ; le pas de vis du rétroprojecteur ne vivra pas longtemps si on doit tout le temps déplacer le trépied »*.

9.3.3. À l'avenir

Les animateurs ont exprimé leur volonté d'intégrer ce jeu au sein de leur animation et leur hâte qu'il soit ouvert à chacun. Ils se sentent pleinement confiants à l'idée de l'utiliser, compétents pour l'animation grâce au suivi du programme, mais aussi grâce à leur propre capacité à adapter la fréquence, l'intensité et le contenu du jeu. Ce premier prototype serait selon eux

Licence CC BY-NC-ND 3.0

prometteur et mériterait d'être maintenu, voire amélioré (*« On a quand même fait le tour des exercices au bout de 3 mois, il en faut d'autres, avec d'autres lieux, et de la musique ! »*). Un animateur rapporte que ce projet lui a permis de se renouveler dans son activité professionnelle, tandis qu'un autre s'inquiète de ne pas disposer du système à l'avenir. Les animateurs ont également proposé de détourner le jeu de son objectif initial d'entraînement en DT pour s'en servir comme support de gymnastique douce ou d'ateliers mémoire. Ces niveaux d'appropriation de l'outil transparaissaient également dans leur proposition de formation interne d'autres animateurs.

Résumé de la Partie 9

Cette enquête qualitative par entretiens semi-directifs réalisés auprès de 2 animateurs ayant pris part au projet INCOME nous apprend que les ressentis de progrès et de satisfaction des participants correspondent à ce que nous avons mesuré par ailleurs. Le jeu semble apprécié à la fois par les résidents et par les animateurs, qui se sont largement approprié l'outil et souhaitent continuer à s'en servir. Le sentiment d'utilité des animateurs est renforcé par les retours positifs des participants.

Cette expérience nous permet de tirer plusieurs conseils de bonne utilisation. Le cadre est très important : il semble favorable de proposer l'animation dans une pièce fermée, isolée, calme, dans la pénombre avec un sol plat et des chaises à disposition. Cette intimité permet des sessions d'entraînement de meilleure qualité avec plus d'attention et de concentration, mais aussi un temps privilégié : les résidents peuvent discuter avant, durant et après le jeu. L'affichage d'un planning commun dans le hall ainsi que des plannings individuels dans les chambres, tout comme le respect d'un planning fixe permettent d'éviter les rappels. Enfin, la constitution des groupes doit être choisie avec soin : soit par affinités, soit au contraire sans se connaître afin de favoriser les rencontres. En ce sens, le jeu peut être considéré comme un véritable outil de médiation sociale pour entretenir ou créer des relations, recréer de l'identité et de l'existence sociale tout en étant un outil très individuel (progression personnelle).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

En conclusion

Licence CC BY-NC-ND 3.0

10. Conclusion générale

Il faut maintenant conclure ce travail de thèse. Dans cette dernière partie, nous reviendrons sur le contexte général et l'objectif de cette thèse. Puis nous développerons explicitement la réponse que nous apportons à notre question de recherche, en rappelant les étapes, les forces et l'originalité de ce travail. Nous verrons enfin quelles sont les suites envisagées à ce travail, tant sur le plan pratique que de recherche.

10.1. Rappel du contexte et de l'objectif de thèse

Le vieillissement des personnes entraîne un déclin des capacités cognitives, motrices, et à réaliser deux tâches simultanément. Ces pertes peuvent entraîner chez les personnes âgées une augmentation des risques de chute, une diminution de la qualité de vie, voire une perte d'autonomie. Dans ce contexte, nous savons que les entraînements en DT sont pertinents pour le maintien des capacités cognitives et motrices des séniors. Le passage par le jeu permettrait de pallier l'une des problématiques des entraînements : motiver puis maintenir les participants engagés.

L'objectif de cette thèse de doctorat était de déterminer si l'utilisation d'un *exergame* personnalisé comme support d'entraînement était efficace à court et moyen terme pour l'amélioration des capacités cognitives, motrices et de DT chez des personnes âgées. Nous souhaitions également connaître l'influence de ce jeu sur le niveau d'activité physique et la qualité de vie des participants, ainsi que son niveau de sécurité et d'adhérence. Enfin, nous avons exploré le niveau d'intensité physique induite par notre jeu.

10.2. Réponse à la question de recherche

Dans un premier temps, nous avons recruté 16 jeunes adultes sains à qui nous avons proposé 3 séances d'entraînement distinctes (en ST, en DT ou via l'*exergame*) afin d'en comparer l'intensité de sollicitation physique. L'intensité de l'effort, qu'elle soit mesurée indirectement via la FC ou bien ressentie à l'aide de l'échelle de Borg modifiée, n'était pas différente quel que soit le type de séance, et semblait modérée. Dans un second temps, nous avons recruté 39 séniors, d'une moyenne d'âge de 85 ans, à qui nous avons proposé un programme d'entraînement en DT utilisant comme support notre *exergame* à raison de 30 minutes d'activité, 2 à 3 fois par semaines durant 12 semaines. L'étude de la différence entre pré et post entraînement indique une amélioration des capacités cognitives chez les participants avec une augmentation des performances de mémoire de travail en ST de 65% et de l'inhibition mentale en DT de 37% - sans dégradation de la performance motrice concomitante. Ces gains ont été maintenus après 12 semaines de suivi sans entraînement. En parallèle, nous n'observons aucune différence après entraînement sur l'inhibition et la flexibilité mentale, sur l'équilibre postural, la mobilité et la peur de tomber, ni sur le niveau de qualité de vie, de motivation et d'activité physique. Ces paramètres ont donc été maintenus durant l'entraînement sans être améliorés, ce qui peut déjà être considéré comme positif dans un contexte gériatrique. Notre *exergame* semblait apprécié par les participants avec un taux d'adhésion de 89%, de réalisation de 88% et de complétion de 87%. De plus, cet entraînement semblait sûr car nous n'avons relevé aucun évènement indésirable grave durant les 286

Licence CC BY-NC-ND 3.0

séances proposées. Enfin, cet entraînement semblait apprécié également par les animateurs, dont la place centrale a été confirmée tout du long de cette étude.

Ainsi, la réponse à notre problématique est que notre *exergame* personnalisé est une solution plaisante et pertinente pour l'entraînement des séniors à court et moyen terme, essentiellement sur le plan cognitif. L'approche multi-domaines dans le contenu semble pertinente. Attention toutefois : tous ces résultats doivent être lus au regard des limites méthodologiques et pratiques évoquées au long du manuscrit.

10.3. Étapes, forces et originalité de ce projet de recherche

Mener cette étude et répondre à notre question de recherche nécessitait différentes étapes.

Première étape : invention et conceptualisation de notre jeu, allant de ses règles à son interface. Nous nous sommes basés sur la littérature traitant des jeux vidéo utilisés dans un cadre d'entraînement chez les séniors, tant sur le fond que sur la forme : jeu collectif, collaboratif, encadré, de difficulté croissante, à l'affichage simple.

Deuxième étape : une fois conçu, nous devions développer notre jeu. À cette fin, nous avons utilisé comme support un équipement déjà éprouvé, le « Tapis Virtuel », sur lequel nous avons ajouté une solution logicielle développée spécialement pour cette recherche. Cette solution logicielle incluait le jeu, son fonctionnement, ses algorithmes, et les interfaces homme-machine sous-jacentes. Le développement de notre jeu a demandé l'encadrement d'élèves ingénieurs en informatique, chargés de traduire les besoins en un livrable utilisable pour notre recherche clinique. Nous disposions alors d'un jeu interactif permettant de jouer par groupes dans un contexte de balade virtuelle au sein de la ville de Limoges.

Troisième étape : conception du programme d'entraînement proposé par le biais de ce jeu. Nous avons alors réalisé une synthèse de la littérature traitant de la prescription d'activité physique, des programmes de prévention des chutes et du maintien de l'autonomie des âgés, mais également des entraînements cognitifs, en DT et des *exergames*, ou encore de la théorie de ludification et de l'auto-détermination. Cette synthèse de la littérature nous a permis de dégager le contenu ainsi que les modalités du programme d'entraînement. Nous possédions alors un *exergame* (addition du programme d'entraînement et du jeu) ciblant les fonctions motrices et cognitives représentant des facteurs de risques de chute chez les séniors. Ce jeu était accessible et simple à la fois par ses règles et son fonctionnement.

Quatrième étape : soumission du projet de recherche pour validation à un comité de protection des personnes. Pour ce faire, nous avons travaillé en collaboration avec le conseil scientifique et méthodologique du CHU de Limoges, organisme engagé dans l'évaluation de la qualité méthodologique et assurant le suivi d'études cliniques. Nous avons également collaboré avec la direction de la recherche et de l'innovation du CHU de Limoges qui assurait la promotion de l'étude.

Cinquième étape : mise à en place de notre étude. Il s'agissait alors de former les animateurs à l'utilisation de l'outil et à l'animation de séance d'activité physique adaptée. Il fallait également rencontrer et recruter les participants au sein des résidences. Puis il s'agissait de coordonner l'intervention multicentrique, tenant compte des impératifs humains et matériels des trois sites.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Enfin, la sixième et dernière étape était la mise à l'épreuve de notre jeu, évaluant son niveau d'intensité physique, son niveau d'efficacité, de sécurité, d'adhésion, et finalement de satisfaction d'utilisation par les participants et les animateurs.

Toutes ces étapes ont impliqué l'encadrement d'animateurs et d'étudiants, la gestion des emplois du temps et l'organisation logistique inhérents à toute étude clinique multicentrique, ainsi que la création d'un lien et le maintien d'une communication entre de nombreux acteurs disséminés dans différentes structures (municipalité, université, CHU et école d'ingénieurs). L'originalité de ce travail de thèse est multiple. Tout d'abord par la création d'un jeu impliquant un développement informatique sur une technologie existante. Ensuite par la mise en place d'une étude clinique directement sur le lieu de vie des personnes durant une pandémie. Enfin par la nécessité de collaboration entre des acteurs variés, mettant en commun le travail de nombreuses personnes dans des domaines multiples, permettant cette recherche clinique (avec une note qualitative) sur fond de développement technologique dans un partenariat local.

10.4. Suites de cette étude

Globalement, nous disposons à présent d'un dispositif qui a plu à ses utilisateurs (animateurs comme joueurs), et qui peut être employé clef en main. Ce travail de recherche sous convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) a créé un précédent de démonstration de collaboration entre différents acteurs territoriaux, ouvrant une porte vers de nombreuses perspectives d'ouverture.

La force de ce travail de recherche est son aspect consistant et pratique. Effectivement, notre jeu est un dispositif tangible, utilisable et modifiable à volonté par la municipalité. De plus, les agents animateurs concernés ont été formés, et sont capables de réaliser de la formation interne à leur tour. Devenus experts, ils sont à présent force de proposition pour l'amélioration du jeu. Il est alors relativement facile pour la municipalité de Limoges d'implémenter le dispositif dans d'autres structures que ses RAMs, telles que des sénioriales ou bien des résidences médicalisées type EHPAD. Comme nous l'avons abordé, nous pensons que d'autres publics pourraient bénéficier de cette intervention, notamment pour ses bénéfices cognitifs.

Un déploiement plus vaste nous permettrait également de mener de nouveaux protocoles de recherche afin de répondre aux nouvelles interrogations apparues durant cette étude. Cette intervention proposée à des séniors en pleine pandémie mondiale de COVID-19, directement à domicile, en conditions réelles et non dans un environnement standardisé, semble prometteuse surtout sur le plan cognitif. Forts de notre expérience et de celle des animateurs, nous pourrions améliorer le dispositif tout en explorant de nouvelles pistes de recherche, quantitatives comme qualitatives, cliniques comme fondamentales. Nous pourrions alors repousser les limites de la présente étude, par exemple : augmentation du nombre de participants, création d'un groupe contrôle, ou évaluation du niveau de sollicitation tant moteur par actimétrie que cognitif par imagerie fonctionnelle de notre jeu, etc.

L'intérêt pour la ville est double. D'abord en poursuivant son inscription comme terre de recherche et d'innovation, tout en proposant un dispositif qui a toute sa place dans le réseau français des villes santé-citoyennes de l'OMS. Mais surtout en ayant à disposition un dispositif

Licence CC BY-NC-ND 3.0

permettant l'entraînement « corps et esprit » de personnes âgées, avec la possibilité de réaliser des séances d'entraînement collectives directement à domicile, fonctionnel même dans un contexte de pandémie mondiale. Ceci est particulièrement dans une optique de « vieillissement actif », où le la santé (cognitive et physique), la participation et la sécurité des personnes vieillissantes déterminent sa qualité de vie.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Références bibliographiques

Rubrique 1

1. Organisation Mondiale de la Santé. Stratégie et Plan d'action mondiaux sur le vieillissement et la santé . 2017.

2. de Jaeger C. Physiologie du vieillissement. 2018;14(1):11.

3. Havighurst RJ. Successful Aging. The Gerontologist. 1961 Mar 1;1(1):8–13.

4. World Health Organization. Active ageing : a policy framework . World Health Organization; 2002. Report No.: WHO/NMH/NPH/02.8.

5. Rowe JW, Kahn RL. Successful Aging. The Gerontologist. 1997 Aug 1;37(4):433–40.

6. Vaillant GE, Mukamal K. Successful Aging. Am J Psychiatry. 2001 Jun 1;158(6):839–47.

7. Freund AM, Riediger M. Successful aging. In: Handbook of psychology: Developmental psychology, Vol 6. Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons, Inc.; 2003. p. 601–28.

8. Magnaldi S, Ukmar M, Vasciaveo A, Longo R, Pozzi-Mucelli RS. Contrast between white and grey matter: MRI appearance with ageing. Eur Radiol. 1993 Dec 1;3(6):513–9.

9. Liu K, Yao S, Chen K, Zhang J, Yao L, Li K, et al. Structural Brain Network Changes across the Adult Lifespan. Front Aging Neurosci. 2017;9:275.

10. Peters R. Ageing and the brain. Postgrad Med J. 2006 Feb;82(964):84–8.

11. Esiri M. Ageing and the brain. J Pathol. 2007;211(2):181–7.

12. Lommatzsch M, Zingler D, Schuhbaeck K, Schloetcke K, Zingler C, Schuff-Werner P, et al. The impact of age, weight and gender on BDNF levels in human platelets and plasma. Neurobiol Aging. 2005 Jan 1;26(1):115–23.

13. Budni J, Bellettini-Santos T, Mina F, Garcez ML, Zugno AI. The involvement of BDNF, NGF and GDNF in aging and Alzheimer's disease. Aging Dis. 2015 Sep;6(5):331–41.

14. Octave J-N, Macq A-F, Philippe B. Le précurseur du peptide amyloïde dans la maladie d'Alzheimer. Médecine Sciences. 1995;11:9.

15. Tarumi T, Zhang R. Cerebral blood flow in normal aging adults: cardiovascular determinants, clinical implications, and aerobic fitness. J Neurochem. 2018;144(5):595–608.

16. Sonntag WE, Eckman DM, Ingraham J, Riddle DR. Regulation of Cerebrovascular Aging. In: Riddle DR, editor. Brain Aging: Models, Methods, and Mechanisms . Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; 2007. (Frontiers in Neuroscience).

17. Marchal G, Rioux P, Petit-Taboué MC, Sette G, Travère JM, Le Poec C, et al. Regional cerebral oxygen consumption, blood flow, and blood volume in healthy human aging. Arch Neurol. 1992 Oct;49(10):1013–20.

18. Zhu Y-S, Tseng BY, Shibata S, Levine BD, Zhang R. Increases in cerebrovascular impedance in older adults. J Appl Physiol. 2011 Aug;111(2):376–81.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

19. Raj D, Yin Z, Breur M, Doorduin J, Holtman IR, Olah M, et al. Increased White Matter Inflammation in Aging- and Alzheimer's Disease Brain. Front Mol Neurosci. 2017;10:206.

20. Sparkman NL, Johnson RW. Neuroinflammation Associated with Aging Sensitizes the Brain to the Effects of Infection or Stress. Neuroimmunomodulation. 2008;15(4–6):323–30.

21. Frank-Cannon TC, Alto LT, McAlpine FE, Tansey MG. Does neuroinflammation fan the flame in neurodegenerative diseases? Mol Neurodegener. 2009 Nov 16;4:47.

22. Park DC. Aging, cognition, and culture: a neuroscientific perspective. Neurosci Biobehav Rev. 2002 Nov 1;26(7):859–67.

23. Verhaeghen P, Cerella J. Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses. Neurosci Biobehav Rev. 2002 Nov 1;26(7):849–57.

24. Bherer L, Belleville S, Hudon C. Le déclin des fonctions exécutives au cours du vieillissement normal, dans la maladie d'Alzheimer et dans la démence frontotemporale. 2004;2:10.

25. Zhou S, Fan J, Lee TMC, Wang C, Wang K. Age-related differences in attentional networks of alerting and executive control in young, middle-aged, and older Chinese adults. Brain Cogn. 2011 Mar 1;75(2):205–10.

26. Raz N. Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In: The handbook of aging and cognition, 2nd ed. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers; 2000. p. 1–90.

27. West RL. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. Psychol Bull. 1996;120(2):272–92.

28. Baddeley A. Recent developments in working memory. Curr Opin Neurobiol. 1998 Apr 1;8(2):234–8.

29. Curtis CE, D'Esposito M. Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. Trends Cogn Sci. 2003 Sep 1;7(9):415–23.

30. Wang M, Gamo NJ, Yang Y, Jin LE, Wang X-J, Laubach M, et al. Neuronal basis of age-related working memory decline. Nature. 2011 Aug;476(7359):210–3.

31. Klencklen G, Banta Lavenex P, Brandner C, Lavenex P. Working memory decline in normal aging: Memory load and representational demands affect performance. Learn Motiv. 2017 Nov 1;60:10–22.

32. Blazer DG, Steffens DC, Busse EW. The American Psychiatric Publishing Textbook of Geriatric Psychiatry . American Psychiatric Pub.; 2004. (American Psychiatric Press Textbook/ Geriatric Psychiatry).

33. Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex 'Frontal Lobe' tasks: a latent variable analysis. Cognit Psychol. 2000 Aug;41(1):49–100.

34. Allali G, Van Der Meulen M, Assal F. Gait and cognition: the impact of executive function. Schweiz Arch Neurol Psychiatr. 2010;161(6):195–9.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

35. Beauchet O, Berrut G. Marche et double tâche : définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé. Psychol Neuropsychiatr Vieil. 2006 Sep 1;4(3):215–25.

36. Treisman AM. Strategies and models of selective attention. Psychol Rev. 1969;76(3):282–99.

37. LaBerge D. Attentional processing: The brain's art of mindfulness. Cambridge, MA, US: Harvard University Press; 1995. x, 262 p. (Attentional processing: The brain's art of mindfulness).

38. Wetherell JL, Reynolds CA, Gatz M, Pedersen NL. Anxiety, Cognitive Performance, and Cognitive Decline in Normal Aging. J Gerontol Ser B. 2002 May 1;57(3):P246–55.

39. Paterniti S, Verdier-Taillefer M-H, Dufouil C, Alpérovitch A. Depressive symptoms and cognitive decline in elderly people: Longitudinal study. Br J Psychiatry. 2002 Nov;181(5):406–10.

40. O'Brien JT. The 'glucocorticoid cascade' hypothesis in man: Prolonged stress may cause permanent brain damage. Br J Psychiatry. 1997 Mar;170(3):199–201.

41. Sapolsky RM. Why stress is bad for your brain. Science. 1996 Aug 9;273(5276):749–50.

42. Baker SC, Frith CD, Dolan RJ. The interaction between mood and cognitive function studied with PET. Psychol Med. 1997 May;27(3):565–78.

43. Segev-Jacubovski O, Herman T, Yogev-Seligmann G, Mirelman A, Giladi N, Hausdorff JM. The interplay between gait, falls and cognition: Can cognitive therapy reduce fall risk? Expert Rev Neurother. 2011;11(7):1057–75.

44. Tornero-Quiñones I, Sáez-Padilla J, Espina Díaz A, Abad Robles MT, Sierra Robles Á. Functional Ability, Frailty and Risk of Falls in the Elderly: Relations with Autonomy in Daily Living. Int J Environ Res Public Health. 2020 Jan;17(3):1006.

45. Figueira H, Figueira J, Mello D, Dantas E. Quality of Life Throughout Ageing. Acta Medica Litu. 2008 Jan 1;15:169–72.

46. Gallou-Guyot M, Quijoux F. Neurophysiologie du vieillissement: du cognitif à la chute. In: Rééducation en neurologie: Eléments pour une pratique clinique raisonnée . Elsevier Masson. Elsevier Health Sciences; 2022. p. 488–98. (Pallot A, editor. Les indispensables en kinésithérapie et physiothérapie).

47. Faulkner JA, Larkin LM, Claflin DR, Brooks SV. Age-related changes in the structure and function of skeletal muscles. Clin Exp Pharmacol Physiol. 2007 Nov;34(11):1091–6.

48. Balagopal P, Rooyackers OE, Adey DB, Ades PA, Nair KS. Effects of aging on in vivo synthesis of skeletal muscle myosin heavy-chain and sarcoplasmic protein in humans. Am J Physiol. 1997 Oct;273(4):E790-800.

49. Greenlund LJS, Nair KS. Sarcopenia--consequences, mechanisms, and potential therapies. Mech Ageing Dev. 2003 Mar;124(3):287–99.

50. Narici MV, Maffulli N. Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. Br Med Bull. 2010;95:139–59.

51. Kadi F, Charifi N, Denis C, Lexell J. Satellite cells and myonuclei in young and elderly women and men. Muscle Nerve. 2004 Jan;29(1):120–7.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

52. Narici MV, Maganaris CN, Reeves ND, Capodaglio P. Effect of aging on human muscle architecture. J Appl Physiol. 2003 Dec 1;95(6):2229–34.

53. Fisher A. Models of Sarcopenia - in Handbook of Models for Human Aging . Elsevier. Burlington; 2006. 977–991 p.

54. Doherty TJ, Vandervoort AA, Taylor AW, Brown WF. Effects of motor unit losses on strength in older men and women. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. 1993 Feb;74(2):868–74.

55. Bobacz S, Sunk I. Age and Joints - in Handbook of Models for Human Aging . Elsevier. Burlington; 2006. 841–851 p.

56. Winter D. Human balance and posture control during standing and walking. Gait Posture. 1995 Dec 1;3(4):193–214.

57. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. Physiol Rev. 2012 Oct;92(4):1651–97.

58. Bruce MF. The relation of tactile thresholds to histology in the fingers of elderly people. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 1980 Aug;43(8):730–4.

59. Goble DJ, Coxon JP, Wenderoth N, Van Impe A, Swinnen SP. Proprioceptive sensibility in the elderly: degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes. Neurosci Biobehav Rev. 2009 Mar;33(3):271–8.

60. Chaput S, Proteau L. Aging and Motor Control. J Gerontol Ser B. 1996 Nov 1;51B(6):P346–55.

61. Al-Aama T. Falls in the elderly: spectrum and prevention. Can Fam Physician Med Fam Can. 2011 Jul;57(7):771–6.

62. Judge JO, Õunpuu S, Davis RB. Effects of Age on the Biomechanics and Physiology of Gait. Clin Geriatr Med. 1996 Nov 1;12(4):659–78.

63. Anton SD, Woods AJ, Ashizawa T, Barb D, Buford TW, Carter CS, et al. Successful aging: Advancing the science of physical independence in older adults. Ageing Res Rev. 2015 Nov 1;24:304–27.

64. Afonso C, Graça P, Kearney JM, Gibney MJ, de Almeida MD. Physical activity in European seniors: attitudes, beliefs and levels. J Nutr Health Aging. 2001 Jan 1;5(4):226–9.

65. Brouwer B, Musselman K, Culham E. Physical Function and Health Status among Seniors with and without a Fear of Falling. Gerontology. 2004;50(3):135–41.

66. Fletcher PC, Hirdes JP. Restriction in activity associated with fear of falling among community-based seniors using home care services. Age Ageing. 2004 May 1;33(3):273–9.

67. Vagetti GC, Barbosa Filho VC, Moreira NB, Oliveira V de, Mazzardo O, Campos W de. Association between physical activity and quality of life in the elderly: a systematic review, 2000-2012. Rev Bras Psiquiatr. 2014 Jan 17;36(1):76–88.

68. Parra-Rizo MA, Sanchís-Soler G. Physical Activity and the Improvement of Autonomy, Functional Ability, Subjective Health, and Social Relationships in Women over the Age of 60. Int J Environ Res Public Health. 2021 Jun 28;18(13):6926.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

69. Tomás JM, Pinazo-Hernandis S, Oliver A, Donio-Bellegarde M, Tomás-Aguirre F. Loneliness and social support: Differential predictive power on depression and satisfaction in senior citizens. J Community Psychol. 2019;47(5):1225–34.

70. Li F, Fisher KJ, Harmer P, McAuley E, Wilson NL. Fear of Falling in Elderly Persons: Association With Falls, Functional Ability, and Quality of Life. J Gerontol Ser B. 2003 Sep 1;58(5):P283–90.

71. Montero-Odasso M, Verghese J, Beauchet O, Hausdorff JM. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. J Am Geriatr Soc. 2012 Nov;60(11):2127–36.

72. Trombetti A, Hars M, Herrmann FR, Kressig RW, Ferrari S, Rizzoli R. Effect of Music-Based Multitask Training on Gait, Balance, and Fall Risk in Elderly People: A Randomized Controlled Trial. Arch Intern Med . 2011 Mar 28;171(6).

73. Joubert C, Chainay H. Aging brain: the effect of combined cognitive and physical training on cognition as compared to cognitive and physical training alone – a systematic review. Clin Interv Aging. 2018 Jul;Volume 13:1267–301.

74. Levin O, Netz Y, Ziv G. The beneficial effects of different types of exercise interventions on motor and cognitive functions in older age: a systematic review. Eur Rev Aging Phys Act . 2017 Dec;14(1).

75. 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 Nov;31:67–79.

76. Plummer P, Zukowski LA, Giuliani C, Hall AM, Zurakowski D. Effects of Physical Exercise Interventions on Gait-Related Dual-Task Interference in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. Gerontology. 2015;62(1):94–117.

77. Abernethy B. Dual-task methodology and motor skills research: Some applications and methodological constraints. Journal of Human Movement Studies. 14th ed. 1988;101–32.

78. Willett G. Paradigme, théorie, modèle, schéma : qu'est-ce donc ? Commun Organ . 1996 .

79. Clark DJ. Automaticity of walking: functional significance, mechanisms, measurement and rehabilitation strategies. Front Hum Neurosci . 2015;9.

80. Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. The role of executive function and attention in gait. Mov Disord Off J Mov Disord Soc. 2008 Feb 15;23(3):329–42; quiz 472.

81. Woollacott MH, Shumway-Cook A. Changes in posture control across the life span--a systems approach. Phys Ther. 1990 Dec;70(12):799–807.

82. Boisgontier MP, Beets IAM, Duysens J, Nieuwboer A, Krampe RT, Swinnen SP. Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks: increased recruitment of generic cognitive resources in older adults. Neurosci Biobehav Rev. 2013 Sep;37(8):1824–37.

83. Amboni M, Barone P, Hausdorff JM. Cognitive contributions to gait and falls: Evidence and implications. Mov Disord. 2013;28(11):1520–33.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

84. Bayot M, Dujardin K, Tard C, Defebvre L, Bonnet CT, Allart E, et al. The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. XXVe Congrès SOFPEL. 2018 Dec 1;48(6):361–75.

85. Pashler H. Dual-task interference in simple tasks: data and theory. Psychol Bull. 1994 Sep;116(2):220–44.

86. Lacour M, Bernard-Demanze L, Dumitrescu M. Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. Neurophysiol Clin Neurophysiol. 2008 Dec;38(6):411–21.

87. Maylor EA, Wing AM. Age Differences in Postural Stability are Increased by Additional Cognitive Demands. J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci. 1996 May 1;51B(3):P143–54.

88. Wajda DA, Mirelman A, Hausdorff JM, Sosnoff JJ. Intervention modalities for targeting cognitive-motor interference in individuals with neurodegenerative disease: a systematic review. Expert Rev Neurother. 2017 Mar 4;17(3):251–61.

89. Pashler H. Graded capacity-sharing in dual-task interference? J Exp Psychol Hum Percept Perform. 1994 Apr;20(2):330–42.

90. Kramer AF, Larish JF, Strayer DL. Training for attentional control in dual task settings: A comparison of young and old adults. J Exp Psychol Appl. 1995;1(1):50–76.

91. 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).

92. Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization. Mov Disord. 2012;27(6):765–70.

93. 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(3):239–46.

94. Shumway-Cook A, Woollacott M, Kerns KA, Baldwin M. The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 1997 Jul;52(4):M232-240.

95. Plummer P, Eskes G, Wallace S, Giuffrida C, Fraas M, Campbell G, et al. Cognitive-Motor Interference During Functional Mobility After Stroke: State of the Science and Implications for Future Research. Arch Phys Med Rehabil. 2013 Dec;94(12):2565-2574.e6.

96. Plummer P, Villalobos RM, Vayda MS, Moser M, Johnson E. Feasibility of Dual-Task Gait Training for Community-Dwelling Adults after Stroke: A Case Series. Stroke Res Treat. 2014 Apr 9;2014:e538602.

97. Wulf G, McNevin N, Shea CH. The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. Q J Exp Psychol A. 2001 Nov;54(4):1143–54.

98. Navon D, Miller J. Role of outcome conflict in dual-task interference. J Exp Psychol Hum Percept Perform. 1987 Aug;13(3):435–48.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

99. Nijboer M, Borst J, van Rijn H, Taatgen N. Single-task fMRI overlap predicts concurrent multitasking interference. NeuroImage. 2014;100:60–74.

100. McIsaac TL, Lamberg EM, Muratori LM. Building a Framework for a Dual Task Taxonomy. BioMed Res Int. 2015;2015:1–10.

101. Prosperini L, Castelli L, De Luca F, Fabiano F, Ferrante I, De Giglio L. Task-dependent deterioration of balance underpinning cognitive-postural interference in MS. Neurology. 2016 Sep 13;87(11):1085–92.

102. Al-Yahya E, Dawes H, Smith L, Dennis A, Howells K, Cockburn J. Cognitive motor interference while walking: a systematic review and meta-analysis. Neurosci Biobehav Rev. 2011 Jan;35(3):715–28.

103. Lundin-Olsson L, Nyberg L, Gustafson Y. 'Stops walking when talking' as a predictor of falls in elderly people. Lancet Lond Engl. 1997 Mar 1;349(9052):617.

104. 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 Aug 6;10:228.

105. Beauchet O, Kressig RW, Najafi E, Aminian K, Dubost V, Mourey F. Age-Related decline of gait control under a dual-task Condition. J Am Geriatr Soc. 2003;51(8):1187–8.

106. Kramer AF, Bherer L, Colcombe SJ, Dong W, Greenough WT. Environmental influences on cognitive and brain plasticity during aging. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2004 Sep;59(9):M940-957.

107. Verghese J, Lipton RB, Katz MJ, Hall CB, Derby CA, Kuslansky G, et al. Leisure activities and the risk of dementia in the elderly. N Engl J Med. 2003 Jun 19;348(25):2508–16.

108. McDougall GJ, Becker H, Pituch K, Acee TW, Vaughan PW, Delville CL. The SeniorWISE Study: Improving Everyday Memory in Older Adults. Arch Psychiatr Nurs. 2010 Oct;24(5):291–306.

109. Borella E, Carretti B, Riboldi F, De Beni R. Working memory training in older adults: Evidence of transfer and maintenance effects. Psychol Aging. 2010;25(4):767–78.

110. Bherer L, Kramer AF, Peterson MS, Colcombe S, Erickson K, Becic E. Transfer effects in task-set cost and dual-task cost after dual-task training in older and younger adults: Further evidence for cognitive plasticity in attentional control in late adulthood. Exp Aging Res. 2008;34(3):188–219.

111. Cheng Y, Wu W, Feng W, Wang J, Chen Y, Shen Y, et al. The effects of multi-domain versus single-domain cognitive training in non-demented older people: a randomized controlled trial. BMC Med. 2012 Mar 27;10:30.

112. Ball K, Berch DB, Helmers KF, Jobe JB, Leveck MD, Marsiske M, et al. Effects of cognitive training interventions with older adults: a randomized controlled trial. JAMA. 2002 Nov 13;288(18):2271–81.

113. Peretz C, Korczyn AD, Shatil E, Aharonson V, Birnboim S, Giladi N. Computer-based, personalized cognitive training versus classical computer games: a randomized double-blind prospective trial of cognitive stimulation. Neuroepidemiology. 2011;36(2):91–9.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

114. Nouchi R, Taki Y, Takeuchi H, Hashizume H, Akitsuki Y, Shigemune Y, et al. Brain Training Game Improves Executive Functions and Processing Speed in the Elderly: A Randomized Controlled Trial. PLoS ONE. 2012 Jan 11;7(1):e29676.

115. Kelly ME, Loughrey D, Lawlor BA, Robertson IH, Walsh C, Brennan S. The impact of cognitive training and mental stimulation on cognitive and everyday functioning of healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. Ageing Res Rev. 2014 May;15:28–43.

116. Lussier M, Gagnon C, Bherer L. An Investigation of Response and Stimulus Modality Transfer Effects after Dual-Task Training in Younger and Older. Front Hum Neurosci. 2012;6:129.

117. Kramer AF, Willis SL. Cognitive Plasticity and Aging. In: Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory . 2003 p. 267–302. (Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory).

118. Alexander NB, Hausdorff JM. Guest Editorial: Linking Thinking, Walking, and Falling. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2008 Dec 1;63(12):1325–8.

119. Woollacott M, Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. Gait Posture. 2002 Aug;16(1):1–14.

120. Tinetti ME. Preventing Falls in Elderly Persons. N Engl J Med. 2003 Jan 2;348(1):42–9.

121. Pichierri G, Wolf P, Murer K, de Bruin ED. Cognitive and cognitive-motor interventions affecting physical functioning: A systematic review. BMC Geriatr . 2011;11(1).

122. Li KZH, Roudaia E, Lussier M, Bherer L, Leroux A, McKinley PA. Benefits of Cognitive Dual-Task Training on Balance Performance in Healthy Older Adults. J Gerontol Ser A. 2010 Dec 1;65A(12):1344–52.

123. Verghese J, Mahoney J, Ambrose AF, Wang C, Holtzer R. Effect of cognitive remediation on gait in sedentary seniors. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2010 Dec;65(12):1338–43.

124. Smith-Ray RL, Hughes SL, Prohaska TR, Little DM, Jurivich DA, Hedeker D. Impact of Cognitive Training on Balance and Gait in Older Adults. J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci. 2015 May;70(3):357–66.

125. Li KZH, Roudaia E, Lussier M, Bherer L, Leroux A, McKinley PA. Benefits of cognitive dual-task training on balance performance in healthy older adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2010 Dec;65(12):1344–52.

126. Marusic U, Verghese J, Mahoney JR. Cognitive-Based Interventions to Improve Mobility: A Systematic Review and Meta-analysis. J Am Med Dir Assoc. 2018 Jun 1;19(6):484-491.e3.

127. Herman T, Mirelman A, Giladi N, Schweiger A, Hausdorff JM. Executive Control Deficits as a Prodrome to Falls in Healthy Older Adults: A Prospective Study Linking Thinking, Walking, and Falling. J Gerontol Ser A. 2010 Oct 1;65A(10):1086–92.

128. Mirelman A, Herman T, Brozgol M, Dorfman M, Sprecher E, Schweiger A, et al. Executive Function and Falls in Older Adults: New Findings from a Five-Year Prospective Study Link Fall Risk to Cognition. PLOS ONE. 2012 Jun 29;7(6):e40297.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

129. Berry AS, Zanto TP, Clapp WC, Hardy JL, Delahunt PB, Mahncke HW, et al. The influence of perceptual training on working memory in older adults. PloS One. 2010 Jul 14;5(7):e11537.

130. Marusic U, Giordani B, Moffat SD, Petrič M, Dolenc P, Pišot R, et al. Computerized cognitive training during physical inactivity improves executive functioning in older adults. Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn. 2018 Jan;25(1):49–69.

131. Wolinsky FD, Unverzagt FW, Smith DM, Jones R, Wright E, Tennstedt SL. The Effects of the ACTIVE Cognitive Training Trial on Clinically Relevant Declines in Health-Related Quality of Life. J Gerontol Ser B. 2006 Sep 1;61(5):S281–7.

132. Millán-Calenti JC, Lorenzo T, Núñez-Naveira L, Buján A, Rodríguez-Villamil JL, Maseda A. Efficacy of a computerized cognitive training application on cognition and depressive symptomatology in a group of healthy older adults: A randomized controlled trial. Arch Gerontol Geriatr. 2015 Nov 1;61(3):337–43.

133. Turunen M, Hokkanen L, Bäckman L, Stigsdotter-Neely A, Hänninen T, Paajanen T, et al. Computer-based cognitive training for older adults: Determinants of adherence. PLOS ONE. 2019 Jul 10;14(7):e0219541.

134. Aronson JK. Compliance, concordance, adherence. Br J Clin Pharmacol. 2007;63(4):383–4.

135. Witlox L, Velthuis MJ, Boer JH, Steins Bisschop CN, Wall E van der, Meulen WJTM van der, et al. Attendance and compliance with an exercise program during localized breast cancer treatment in a randomized controlled trial: The PACT study. Roviello G, editor. PLOS ONE. 2019 May 8;14(5):e0215517.

136. Baumgartner PC, Haynes RB, Hersberger KE, Arnet I. A Systematic Review of Medication Adherence Thresholds Dependent of Clinical Outcomes. Front Pharmacol. 2018 Nov 20;9:1290.

137. Kueider AM, Parisi JM, Gross AL, Rebok GW. Computerized Cognitive Training with Older Adults: A Systematic Review. PLOS ONE. 2012 Jul 11;7(7):e40588.

138. Shephard RJ. Exercise and aging: extending independence in older adults. Geriatrics. 1993 May;48(5):61–4.

139. Stewart KJ. Physical activity and aging. Ann N Y Acad Sci. 2005 Dec;1055:193–206.

140. Nelson ME, Rejeski WJ, Blair SN, Duncan PW, Judge JO, King AC, et al. Physical activity and public health in older adults: recommendation from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. Med Sci Sports Exerc. 2007 Aug;39(8):1435–45.

141. Bouaziz W, Vogel T, Schmitt E, Kaltenbach G, Geny B, Lang PO. Health benefits of aerobic training programs in adults aged 70 and over: a systematic review. Arch Gerontol Geriatr. 2017 Apr;69:110–27.

142. Lesinski M, Hortobágyi T, Muehlbauer T, Gollhofer A, Granacher U. Effects of Balance Training on Balance Performance in Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. Sports Med Auckl NZ. 2015 Dec;45(12):1721–38.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

143. Zijlstra A, Mancini M, Chiari L, Zijlstra W. Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations: a systematic review. J NeuroEngineering Rehabil. 2010 Dec 9;7(1):58.

144. Lopez P, Pinto RS, Radaelli R, Rech A, Grazioli R, Izquierdo M, et al. Benefits of resistance training in physically frail elderly: a systematic review. Aging Clin Exp Res. 2018 Aug;30(8):889–99.

145. Bouaziz W, Lang PO, Schmitt E, Kaltenbach G, Geny B, Vogel T. Health benefits of multicomponent training programmes in seniors: a systematic review. Int J Clin Pract. 2016 Jul;70(7):520–36.

146. Lopez P, Izquierdo M, Radaelli R, Sbruzzi G, Grazioli R, Pinto RS, et al. Effectiveness of Multimodal Training on Functional Capacity in Frail Older People: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. J Aging Phys Act. 2018 01;26(3):407–18.

147. Thomas E, Battaglia G, Patti A, Brusa J, Leonardi V, Palma A, et al. Physical activity programs for balance and fall prevention in elderly. Medicine (Baltimore). 2019 Jul 5;98(27):e16218.

148. Zijlstra GAR, van Haastregt JCM, van Rossum E, van Eijk JTM, Yardley L, Kempen GIJM. Interventions to reduce fear of falling in community-living older people: a systematic review. J Am Geriatr Soc. 2007 Apr;55(4):603–15.

149. Li F, Fisher KJ, Harmer P, McAuley E, Wilson NL. Fear of Falling in Elderly Persons: Association With Falls, Functional Ability, and Quality of Life. J Gerontol Ser B. 2003 Sep 1;58(5):P283–90.

150. Miyachi M, Tripette J, Kawakami R, Murakami H. '+10 min of Physical Activity per Day': Japan Is Looking for Efficient but Feasible Recommendations for Its Population. J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo). 2015;61 Suppl:S7-9.

151. Stewart AL, Mills KM, Sepsis PG, King AC, McLellan BY, Roitz K, et al. Evaluation of CHAMPS, a physical activity promotion program for older adults. Ann Behav Med Publ Soc Behav Med. 1997;19(4):353–61.

152. Stewart AL, Verboncoeur CJ, McLellan BY, Gillis DE, Rush S, Mills KM, et al. Physical activity outcomes of CHAMPS II: a physical activity promotion program for older adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2001 Aug;56(8):M465-470.

153. Kramer AF, Erickson KI, Colcombe SJ. Exercise, cognition, and the aging brain. J Appl Physiol. 2006 Oct;101(4):1237–42.

154. Barnes DE, Yaffe K, Satariano WA, Tager IB. A longitudinal study of cardiorespiratory fitness and cognitive function in healthy older adults. J Am Geriatr Soc. 2003 Apr;51(4):459–65.

155. Benedict C, Brooks SJ, Kullberg J, Nordenskjöld R, Burgos J, Le Grevès M, et al. Association between physical activity and brain health in older adults. Neurobiol Aging. 2013 Jan;34(1):83–90.

156. Kramer AF, Erickson KI. Effects of physical activity on cognition, well-being, and brain: Human interventions. Alzheimers Dement. 2007 Apr 1;3(2, Supplement):S45–51.

157. Hötting K, Röder B. Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. Neurosci Biobehav Rev. 2013 Nov 1;37(9, Part B):2243–57.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

158. 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 Sep 11;2013:e657508.

159. Stewart AL, King AC. Evaluating the Efficacy of Physical Activity for Influencing Quality-of-Life Outcomes in Older Adults. Ann Behav Med. 1991 Jan 1;13(3):108–16.

160. Acree LS, Longfors J, Fjeldstad AS, Fjeldstad C, Schank B, Nickel KJ, et al. Physical activity is related to quality of life in older adults. Health Qual Life Outcomes. 2006 Jun 30;4(1):37.

161. Langlois F, Vu TTM, Chassé K, Dupuis G, Kergoat M-J, Bherer L. Benefits of physical exercise training on cognition and quality of life in frail older adults. J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci. 2013 May;68(3):400–4.

162. Rejeski WJ, Mihalko SL. Physical Activity and Quality of Life in Older Adults. J Gerontol Ser A. 2001 Oct 1;56(suppl_2):23–35.

163. Blumenthal JA, Babyak MA, Moore KA, Craighead WE, Herman S, Khatri P, et al. Effects of Exercise Training on Older Patients With Major Depression. Arch Intern Med. 1999 Oct 1;159(19):2349–56.

164. Barbour KA, Blumenthal JA. Exercise training and depression in older adults. Neurobiol Aging. 2005 Dec 1;26(1, Supplement):119–23.

165. Heinzel S, Lawrence JB, Kallies G, Rapp MA, Heissel A. Using Exercise to Fight Depression in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. GeroPsych. 2015 Dec;28(4):149–62.

166. Robison JI, Rogers MA. Adherence to exercise programmes. Recommendations. Sports Med Auckl NZ. 1994 Jan;17(1):39–52.

167. Nyman SR, Victor CR. Older people's participation in and engagement with falls prevention interventions in community settings: an augment to the Cochrane systematic review. Age Ageing. 2012 Jan;41(1):16–23.

168. Hawley H. Older adults' perspectives on home exercise after falls rehabilitation: Understanding the importance of promoting healthy, active ageing. Health Educ J. 2009 Sep 1;68(3):207–18.

169. Jancey J, Lee A, Howat P, Clarke A, Wang K, Shilton T. Reducing Attrition in Physical Activity Programs for Older Adults. J Aging Phys Act. 2007 Apr;15(2):152–65.

170. Rhodes RE, Martin AD, Taunton JE, Rhodes EC, Donnelly M, Elliot J. Factors Associated with Exercise Adherence Among Older Adults. Sports Med. 1999 Dec 1;28(6):397–411.

171. You JH, Shetty A, Jones T, Shields K, Belay Y, Brown D. Effects of dual-task cognitive-gait intervention on memory and gait dynamics in older adults with a history of falls: A preliminary investigation. NeuroRehabilitation. 2009 Jan 1;24(2):193–8.

172. Fabre C, Chamari K, Mucci P, Massé-Biron J, Préfaut C. Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. Int J Sports Med. 2002;23(6):415–21.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

173. 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 Sep;40(9):765–801.

174. Tait JL, Duckham RL, Milte CM, Main LC, Daly RM. Influence of Sequential vs. Simultaneous Dual-Task Exercise Training on Cognitive Function in Older Adults. Front Aging Neurosci . 2017 Nov 7;9.

175. Fissler P, Küster O, Schlee W, Kolassa I-T. Novelty Interventions to Enhance Broad Cognitive Abilities and Prevent Dementia. In: Progress in Brain Research . Elsevier; 2013. p. 403–34.

176. Bamidis PD, Vivas AB, Styliadis C, Frantzidis C, Klados M, Schlee W, et al. A review of physical and cognitive interventions in aging. Neurosci Biobehav Rev. 2014 Jul;44:206–20.

177. Bherer L. Cognitive plasticity in older adults: effects of cognitive training and physical exercise. Ann N Y Acad Sci. 2015 Mar;1337:1–6.

178. Yamada M, Aoyama T, Tanaka B, Nagai K, Ichihashi N. Seated stepping exercise in a dual-task condition improves ambulatory function with a secondary task: a randomized controlled trial. Aging Clin Exp Res. 2011 Oct 1;23(5):386–92.

179. Wang R-Y, Wang Y-L, Cheng F-Y, Chao Y-H, Chen C-L, Yang Y-R. Effects of combined exercise on gait variability in community-dwelling older adults. Age Dordr Neth. 2015 Jun;37(3):9780.

180. Hiyamizu M, Morioka S, Shomoto K, Shimada T. Effects of dual task balance training on dual task performance in elderly people: a randomized controlled trial. Clin Rehabil. 2012 Jan;26(1):58–67.

181. Agmon M, Belza B, Nguyen HQ, Logsdon R, Kelly VE. A systematic review of interventions conducted in clinical or community settings to improve dual-task postural control in older adults. Clin Interv Aging. 2014 Mar;477.

182. Wollesen B, Voelcker-Rehage C. Training effects on motor-cognitive dual-task performance in older adults. Eur Rev Aging Phys Act. 2014 Apr;11(1):5–24.

183. Booth V, Hood V, Kearney F. Interventions incorporating physical and cognitive elements to reduce falls risk in cognitively impaired older adults: a systematic review. JBI Database Syst Rev Implement Rep. 2016;14(5):110–35.

184. 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 Aug 5;63:101135.

185. 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 Off J Eur Group Res Elder Phys Act. 2020;17:9.

186. 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 Mar 1;66:101232.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

187. 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 Jan;17(17):6166.

188. Dhir S, Teo W-P, Chamberlain SR, Tyler K, Yücel M, Segrave RA. The Effects of Combined Physical and Cognitive Training on Inhibitory Control: A Systematic Review and Meta-Analysis. Neurosci Biobehav Rev. 2021 Sep 1;128:735–48.

189. Varela-Vásquez LA, Minobes-Molina E, Jerez-Roig J. Dual-task exercises in older adults: A structured review of current literature. J Frailty Sarcopenia Falls. 2020 Jun 1;05(02):31–7.

190. 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.

191. Kamegaya T, Araki Y, Kigure H, Long-Term-Care Prevention Team of Maebashi City, Yamaguchi H. Twelve-week physical and leisure activity programme improved cognitive function in community-dwelling elderly subjects: a randomized controlled trial: Preventing cognitive decline. Psychogeriatrics. 2014 Mar;14(1):47–54.

192. Hackney ME, Byers C, Butler G, Sweeney M, Rossbach L, Bozzorg A. Adapted Tango Improves Mobility, Motor-Cognitive Function, and Gait but Not Cognition in Older Adults in Independent Living. J Am Geriatr Soc. 2015 Oct;63(10):2105–13.

193. Maki Y, Ura C, Yamaguchi T, Murai T, Isahai M, Kaiho A, et al. Effects of Intervention Using a Community-Based Walking Program for Prevention of Mental Decline: A Randomized Controlled Trial. J Am Geriatr Soc. 2012 Mar;60(3):505–10.

194. Duque G, Boersma D, Loza-Diaz G, Hassan S, Suarez H, Geisinger D, et al. Effects of balance training using a virtual-reality system in older fallers. Clin Interv Aging. 2013;8:257–63.

195. Rendon AA, Lohman EB, Thorpe D, Johnson EG, Medina E, Bradley B. The effect of virtual reality gaming on dynamic balance in older adults. Age Ageing. 2012 Jul 1;41(4):549–52.

196. Pichierri G, Coppe A, Lorenzetti S, Murer K, de Bruin ED. The effect of a cognitive-motor intervention on voluntary step execution under single and dual task conditions in older adults: a randomized controlled pilot study. Clin Interv Aging. 2012;7:175–84.

197. Uemura K, Yamada M, Nagai K, Tateuchi H, Mori S, Tanaka B, et al. Effects of dual-task switch exercise on gait and gait initiation performance in older adults: Preliminary results of a randomized controlled trial. Arch Gerontol Geriatr. 2012 Mar;54(2):e167–71.

198. 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(3):589–600.

199. Hamacher D, Hamacher D, Rehfeld K, Schega L. Motor-cognitive dual-task training improves local dynamic stability of normal walking in older individuals. Clin Biomech. 2016 Feb 1;32:138–41.

200. Bruderer-Hofstetter M, Rausch-Osthoff A-K, Meichtry A, Münzer T, Niedermann K. Effective multicomponent interventions in comparison to active control and no interventions on physical capacity, cognitive function and instrumental activities of daily

Licence CC BY-NC-ND 3.0

living in elderly people with and without mild impaired cognition – A systematic review and network meta-analysis. Ageing Res Rev. 2018 Aug;45:1–14.

201. Gheysen F, Poppe L, DeSmet A, Swinnen S, Cardon G, De Bourdeaudhuij I, 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(1).

202. Wu VX, Chi Y, Lee JK, Goh HS, Chen DYM, Haugan G, et al. The effect of dance interventions on cognition, neuroplasticity, physical function, depression, and quality of life for older adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. Int J Nurs Stud. 2021 Oct 1;122:104025.

203. Wu C, Yi Q, Zheng X, Cui S, Chen B, Lu L, et al. Effects of Mind-Body Exercises on Cognitive Function in Older Adults: A Meta-Analysis: MIND-BODY EXERCISES AND COGNITIVE PERFORMANCE. J Am Geriatr Soc. 2019 Apr;67(4):749–58.

204. Parial LL, Lam SC, Sumile EF, Leung AYM. MIX-and-Match or Mismatch? Exploring Older Adults' Perspectives About Zumba Dance and Its Potential Utilization for Dual-Task Training . MEDICINE & PHARMACOLOGY; 2021 May.

205. Liu C-L, Cheng F-Y, Wei M-J, Liao Y-Y. Effects of Exergaming-Based Tai Chi on Cognitive Function and Dual-Task Gait Performance in Older Adults With Mild Cognitive Impairment: A Randomized Control Trial. Front Aging Neurosci. 2022 Mar 15;14:761053.

206. 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.

207. Bleakley CM, Charles D, Porter-Armstrong A, McNeill MDJ, McDonough SM, McCormack B. Gaming for health: a systematic review of the physical and cognitive effects of interactive computer games in older adults. J Appl Gerontol Off J South Gerontol Soc. 2015 Apr;34(3):NP166-189.

208. Molina KI, Ricci NA, de Moraes SA, Perracini MR. Virtual reality using games for improving physical functioning in older adults: a systematic review. J Neuroengineering Rehabil. 2014 Nov 15;11:156.

209. 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 2001. 2018 Jun;41(2):108–23.

210. Larsen LH, Schou L, Lund HH, Langberg H. The Physical Effect of Exergames in Healthy Elderly-A Systematic Review. Games Health J. 2013 Aug;2(4):205–12.

211. Laufer Y, Dar G, Kodesh E. Does a Wii-based exercise program enhance balance control of independently functioning older adults? A systematic review. Clin Interv Aging. 2014;9:1803–13.

212. 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 May 23;8(5).

213. Bouchon J. 1 + 3 + 3 ou comment tenter d'être efficace en gériatrie. Rev Prat Med Gen. 1984;(34):888.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

214. Vázquez FL, Otero P, García-Casal JA, Blanco V, Torres ÁJ, Arrojo M. Efficacy of video game-based interventions for active aging. A systematic literature review and meta-analysis. PLOS ONE. 2018 Dec 11;13(12):e0208192.

215. Mouton A, Gillet N, Mouton F, Van Kann D, Bruyere O, Cloes M, et al. Effects of a giant exercising board game intervention on ambulatory physical activity among nursing home residents: a preliminary study. Clin Interv Aging. 2017 May;Volume 12:847–58.

216. Baranowski T, Buday R, Thompson DI, Baranowski J. Playing for Real: Video Games and Stories for Health-Related Behavior Change. Am J Prev Med. 2008 Jan;34(1):74-82.e10.

217. Bonnechère B, Jansen B, Omelina L, Van Sint Jan S. The use of commercial video games in rehabilitation: a systematic review. Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation. 2016 Dec;39(4):277–90.

218. Park J, Yim J. A New Approach to Improve Cognition, Muscle Strength, and Postural Balance in Community-Dwelling Elderly with a 3-D Virtual Reality Kayak Program. Tohoku J Exp Med. 2016;238(1):1–8.

219. Oberhauser M, Dreyer D. A virtual reality flight simulator for human factors engineering. Cogn Technol Work. 2017 Sep 1;19(2):263–77.

220. Kappen DL, Mirza-Babaei P, Nacke LE. Older Adults' Physical Activity and Exergames: A Systematic Review. Int J Human–Computer Interact. 2019 Jan 20;35(2):140–67.

221. Wang R-Y, Huang Y-C, Zhou J-H, Cheng S-J, Yang Y-R. Effects of Exergame-Based Dual-Task Training on Executive Function and Dual-Task Performance in Community-Dwelling Older People: A Randomized-Controlled Trial. Games Health J . 2021.

222. Schoene D, Lord SR, Delbaere K, Severino C, Davies TA, Smith ST. A Randomized Controlled Pilot Study of Home-Based Step Training in Older People Using Videogame Technology. Berthold HK, editor. PLoS ONE. 2013 Mar 5;8(3):e57734.

223. Yang W-C, Wang H-K, Wu R-M, Lo C-S, Lin K-H. Home-based virtual reality balance training and conventional balance training in Parkinson's disease: A randomized controlled trial. J Formos Med Assoc. 2016;115(9):734–43.

224. Anders P, Lehmann T, Müller H, Grønvik KB, Skjæret-Maroni N, Baumeister J, et al. Exergames Inherently Contain Cognitive Elements as Indicated by Cortical Processing. Front Behav Neurosci . 2018;12.

225. Lajoie Y. Effect of computerized feedback postural training on posture and attentional demands in older adults. Aging Clin Exp Res. 2004 Oct;16(5):363–8.

226. Rosenberg D, Depp CA, Vahia IV, Reichstadt J, Palmer BW, Kerr J, et al. Exergames for Subsyndromal Depression in Older Adults: A Pilot Study of a Novel Intervention. Am J Geriatr Psychiatry. 2010 Mar;18(3):221–6.

227. Studenski S, Perera S, Hile E, Keller V, Spadola-Bogard J, Garcia J. Interactive video dance games for healthy older adults. J Nutr Health Aging. 2010 Dec;14(10):850–2.

228. Schoene D, Valenzuela T, Lord SR, de Bruin ED. The effect of interactive cognitive-motor training in reducing fall risk in older people: a systematic review. BMC Geriatr . 2014 Dec;14(1).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

229. Lord SR, Close JCT. New horizons in falls prevention. Age Ageing. 2018 Jul 1;47(4):492–8.

230. 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 Jul;78:34–43.

231. Li J, Theng Y-L, Foo S. Effect of Exergames on Depression: A Systematic Review and Meta-Analysis. Cyberpsychology Behav Soc Netw. 2016 Jan;19(1):34–42.

232. Monteiro-Junior RS, Rodrigues AC de MA, Felício LFF, Figueiredo LF da S, Xavier-Rocha TB. Exergames: what they are and how they can be used to successful aging? In: Assessments, Treatments and Modeling in Aging and Neurological Disease . Elsevier; 2021. p. 415–24.

233. Monteiro-Junior RS. Neuroscience of Exercise and Virtual Reality Applications. ARC J Neurosci . 2016.

234. Toulotte C, Toursel C, Olivier N. Wii Fit® training vs. Adapted Physical Activities: which one is the most appropriate to improve the balance of independent senior subjects? A randomized controlled study. Clin Rehabil. 2012 Sep;26(9):827–35.

235. Rodrigues E, Valderramas S, Rossetin L, Gomes AR. Effects of video game training on the musculoskeletal function of older adults: A systematic review and meta-analysis. Top Geriatr Rehabil. 2014;30(4):238–45.

236. Neri SG, Cardoso JR, Cruz L, Lima RM, de Oliveira RJ, Iversen MD, et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. Clin Rehabil. 2017 Oct;31(10):1292–304.

237. Donath L, Rössler R, Faude O. 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 Med Auckl NZ. 2016 Sep;46(9):1293–309.

238. Choi SD, Guo L, Kang D, Xiong S. Exergame technology and interactive interventions for elderly fall prevention: A systematic literature review. Appl Ergon. 2017 Nov;65:570–81.

239. Choi SD, Guo L, Kang D, Xiong S. Exergame technology and interactive interventions for elderly fall prevention: A systematic literature review. Appl Ergon. 2017 Nov 1;65:570–81.

240. Staiano AE, Flynn R. Therapeutic Uses of Active Videogames: A Systematic Review. Games Health J. 2014 Dec 1;3(6):351–65.

241. Ge L, Su T-T, An Y, Mejía ST. The effectiveness of exergames on fear of falling in community-dwelling older adults: a systematic review. Aging Ment Health. 2021 Jul 22;0(0):1–12.

242. Brox E, Luque LF, Evertsen GJ, Hernandez JEG. Exergames for elderly: Social exergames to persuade seniors to increase physical activity. In: 2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth) and Workshops. 2011. p. 546–9.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

243. Peng W, Crouse JC, Lin J-H. Using Active Video Games for Physical Activity Promotion: A Systematic Review of the Current State of Research. Health Educ Behav. 2013 Apr 1;40(2):171–92.

244. Williams T, Kennedy-Malone L, Thompson J, Monge EC. The effect of an exergame on physical activity among older adults residing in a long-term care facility: A pilot study. Geriatr Nur (Lond). 2022 Mar 1;44:48–53.

245. Hwang Y, Deng Y, Manninen M, Waller S, Evans EM, Schmidt MD, et al. Short- and longer-term psychological and behavioral effects of exergaming and traditional aerobic training: A randomized controlled trial. Int J Sport Exerc Psychol. 2022 Jan 17;0(0):1–18.

246. 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.

247. Yen H-Y, Chiu H-L. Virtual Reality Exergames for Improving Older Adults' Cognition and Depression: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Control Trials. J Am Med Dir Assoc. 2021 May 1;22(5):995–1002.

248. Ogawa EF, Huang H, Yu L-F, Gona PN, Fleming RK, Leveille SG, et al. Effects of Exergaming on Cognition and Gait in Older Adults at Risk for Falling. Med Sci Sports Exerc. 2020 Mar;52(3):754–61.

249. 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 Jul 18;9(1):163.

250. Chen Y, Zhang Y, Guo Z, Bao D, Zhou J. 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. J NeuroEngineering Rehabil. 2021 Nov 24;18(1):164.

251. Ge L, Su T-T, An Y, Mejía ST. The effectiveness of exergames on fear of falling in community-dwelling older adults: a systematic review. Aging Ment Health. 2021 Jul 22;0(0):1–12.

252. Janhunen M, Karner V, Katajapuu N, Niiranen O, Immonen J, Karvanen J, et al. Effectiveness of Exergame Intervention on Walking in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Phys Ther . 2021.

253. Corregidor-Sánchez AI, Segura-Fragoso A, Rodríguez-Hernández M, Criado-Alvarez JJ, González-Gonzalez J, Polonio-López B. Can exergames contribute to improving walking capacity in older adults? A systematic review and meta-analysis. Maturitas. 2020 Feb 1;132:40–8.

254. Shida N, Yagiz G, Yamada T. The Effects of Exergames on Muscle Architecture: A Systematic Review and Meta-Analysis. Appl Sci. 2021 Jan;11(21):10325.

255. Sato K, Kuroki K, Saiki S, Nagatomi R. Improving Walking, Muscle Strength, and Balance in the Elderly with an Exergame Using Kinect: A Randomized Controlled Trial. Games Health J. 2015 Jun 1;4(3):161–7.

256. Santos GOR, Wolf R, Silva MM, Rodacki ALF, Pereira G. Does exercise intensity increment in exergame promote changes in strength, functional capacity and perceptual

Licence CC BY-NC-ND 3.0

parameters in pre-frail older women? A randomized controlled trial. Exp Gerontol. 2019 Feb 1;116:25–30.

257. Torre MM, Temprado J-J. Effects of Exergames on Brain and Cognition in Older Adults: A Review Based on a New Categorization of Combined Training Intervention. Front Aging Neurosci. 2022 Mar 30;14:859715.

258. Drazich BF, LaFave S, Crane BM, Szanton SL, Carlson MC, Budhathoki C, et al. Exergames and Depressive Symptoms in Older Adults: A Systematic Review. Games Health J. 2020 Jun 18;9(5):339–45.

259. Kim J, Timmerman CE. Effects of supportive feedback messages on exergame experiences: A mediating role of social presence. J Media Psychol Theor Methods Appl. 2018;30(1):29–40.

260. Li J, Theng Y-L, Foo S, Xu X. Exergames vs. traditional exercise: investigating the influencing mechanism of platform effect on subthreshold depression among older adults. Aging Ment Health. 2018 Dec;22(12):1634–41.

261. Cacciata M, Stromberg A, Lee J-A, Sorkin D, Lombardo D, Clancy S, et al. Effect of exergaming on health-related quality of life in older adults: A systematic review. Int J Nurs Stud. 2019 May 1;93:30–40.

262. Wollesen B, Voelcker-Rehage C. Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults: A systematic review. Eur Rev Aging Phys Act. 2014 Apr;11(1):5–24.

263. Haddock B L, Jarvis S, Klug N R, Gonzalez T, Barsaga B, Siegel S R, et al. Measurement of energy expenditure while playing exergames at a self-selected intensity. Open Sports Sci J. 2012;5:1–6.

264. Wu P-T, Wu W-L, Chu I-H. Energy Expenditure and Intensity in Healthy Young Adults during Exergaming. Am J Health Behav. 2015 Jul;39(4):556–61.

265. Polechoński J, Dębska M, Dębski PG. Exergaming Can Be a Health-Related Aerobic Physical Activity. BioMed Res Int. 2019;2019:1890527.

266. Rodrigues G, Felipe D, Silva E, Freitas W, Higino W, Silva F, et al. Acute cardiovascular responses while playing virtual games simulated by Nintendo Wii®. J Phys Ther Sci. 2015 Sep 30;27:2849–51.

267. Sanders GJ, Peacock CA, Barkley JE, Gish B, Brock S, Volpenhein J. Heart Rate and Liking During 'Kinect Boxing' Versus 'Wii Boxing': The Potential for Enjoyable Vigorous Physical Activity Videogames. Games Health J. 2015 Aug;4(4):265–70.

268. Rebsamen S, Knols RH, Pfister PB, de Bruin ED. Exergame-Driven High-Intensity Interval Training in Untrained Community Dwelling Older Adults: A Formative One Group Quasi- Experimental Feasibility Trial. Front Physiol. 2019 Aug 7;10:1019.

269. Mellecker RR, McManus AM. Active video games and physical activity recommendations: a comparison of the Gamercize Stepper, XBOX Kinect and XaviX J-Mat. J Sci Med Sport. 2014 May;17(3):288–92.

270. Eggenberger P, Wolf M, Schumann M, de Bruin ED. Exergame and Balance Training Modulate Prefrontal Brain Activity during Walking and Enhance Executive Function in Older Adults. Front Aging Neurosci . 2016;8.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

271. Liao Y-Y, Chen I-H, Hsu W-C, Tseng H-Y, Wang R-Y. Effect of exergaming versus combined exercise on cognitive function and brain activation in frail older adults: A randomised controlled trial. Ann Phys Rehabil Med. 2021 Sep 1;64(5):101492.

272. Baert V, Gorus E, Mets T, Geerts C, Bautmans I. Motivators and barriers for physical activity in the oldest old: A systematic review. Ageing Res Rev. 2011 Sep 1;10(4):464–74.

273. Campo M, Louvet B, Dosseville F, Ferrand C, Hagger M, Martinent G, et al. Promotion de l'activité physique chez les seniors. Revue systématique des programmes d'intervention centrés sur les barrières affectives. Staps. 2015;n° 110(4):115–27.

274. Nigg CR, Borrelli B, Maddock J, Dishman RK. A Theory of Physical Activity Maintenance. Appl Psychol. 2008;57(4):544–60.

275. Nyman SR, Victor CR. Older people's recruitment, sustained participation, and adherence to falls prevention interventions in institutional settings: A supplement to the cochrane systematic review. Age Ageing. 2011;40(4):430–6.

276. Lyons EJ. Cultivating Engagement and Enjoyment in Exergames Using Feedback, Challenge, and Rewards. Games Health J. 2014 Oct 20;4(1):12–8.

277. Mellecker R, Lyons EJ, Baranowski T. Disentangling Fun and Enjoyment in Exergames Using an Expanded Design, Play, Experience Framework: A Narrative Review. Games Health J. 2013 May 7;2(3):142–9.

278. Deterding S, Dixon D, Khaled R, Nacke L. From game design elements to gamefulness: defining 'gamification'. In: Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference on Envisioning Future Media Environments - MindTrek '11 . Tampere, Finland: ACM Press; 2011. p. 9.

279. Koivisto J, Hamari J. Gamification of physical activity: A systematic literature review of comparison studies. 2019;12.

280. Deci EL, Ryan RM. Facilitating optimal motivation and psychological well-being across life's domains. Can Psychol Can. 2008 Feb;49(1):14–23.

281. Deci EL, Ryan RM. The Empirical Exploration of Intrinsic Motivational Processes11Preparation of this chapter was facilitated by Research Grant MH 28600 from the National Institute of Mental Health to the first author. In: Berkowitz L, editor. Advances in Experimental Social Psychology . Academic Press; 1980. p. 39–80.

282. Ryan RM, Deci EL. Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. Contemp Educ Psychol. 2000 Jan 1;25(1):54–67.

283. Manera V, Ben-Sadoun G, Aalbers T, Agopyan H, Askenazy F, Benoit M, et al. Recommendations for the Use of Serious Games in Neurodegenerative Disorders: 2016 Delphi Panel. Front Psychol. 2017 Jul 25;8:1243.

284. Robert PH, KÃ¶nig A, Amieva H, Andrieu S, Bremond F, Bullock R, et al. Recommendations for the use of Serious Games in people with Alzheimer's Disease, related disorders and frailty. Front Aging Neurosci . 2014 Mar 24;6.

285. Woods B, O'Philbin L, Farrell E, Spector A, Orrell M. Reminiscence therapy for dementia. Cochrane Database Syst Rev . 2018;(3).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

286. American College of Sports Medicine, Pescatello LS. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins; 2014.

287. Sherrington C, Michaleff ZA, Fairhall N, Paul SS, Tiedemann A, Whitney J, et al. Exercise to prevent falls in older adults: an updated systematic review and meta-analysis. Br J Sports Med. 2017 Dec;51(24):1750–8.

288. Physical Activity and Public Health: Updated Recommendation for Adults From the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. Circulation. 2007 Aug 28;116(9):1081–93.

289. Lauenroth A, Ioannidis AE, Teichmann B. Influence of combined physical and cognitive training on cognition: a systematic review. BMC Geriatr . 2016;16(1).

290. Lipardo DS, Aseron AMC, Kwan MM, Tsang WW. Effect of Exercise and Cognitive Training on Falls and Fall-Related Factors in Older Adults With Mild Cognitive Impairment: A Systematic Review. Arch Phys Med Rehabil. 2017;98(10):2079–96.

291. Li H, Li J, Li N, Li B, Wang P, Zhou T. Cognitive intervention for persons with mild cognitive impairment: A meta-analysis. Ageing Res Rev. 2011 Apr;10(2):285–96.

292. Lampit A, Hallock H, Valenzuela M. Computerized Cognitive Training in Cognitively Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Effect Modifiers. Gandy S, editor. PLoS Med. 2014 Nov 18;11(11):e1001756.

293. Fiatarone Singh MA, Gates N, Saigal N, Wilson GC, Meiklejohn J, Brodaty H, et al. The Study of Mental and Resistance Training (SMART) Study—Resistance Training and/or Cognitive Training in Mild Cognitive Impairment: A Randomized, Double-Blind, Double-Sham Controlled Trial. J Am Med Dir Assoc. 2014 Dec;15(12):873–80.

294. Temprado J-J. Can Exergames Be Improved to Better Enhance Behavioral Adaptability in Older Adults? An Ecological Dynamics Perspective. Front Aging Neurosci. 2021 May 28;13:670166.

295. Chao Y-Y RN, GNP-BC, PhD, Scherer YK RN, EdD, Montgomery CA PhD, ANP-C, GNP. Effects of Using Nintendo Wii(TM) Exergames in Older Adults: A Review of the Literature. J Aging Health. 2015 Apr;27(3):379.

296. Perrochon A, Mandigout S, Petruzzellis S, Soria Garcia N, Zaoui M, Berthoz A, et al. The influence of age in women in visuo-spatial memory in reaching and navigation tasks with and without landmarks. Neurosci Lett. 2018 Sep;684:13–7.

297. Kronovsek T, Hermand E, Berthoz A, Castilla A, Gallou-Guyot M, Daviet J-C, et al. Age-related decline in visuo-spatial working memory is reflected by dorsolateral prefrontal activation and cognitive capabilities. Behav Brain Res. 2020 Nov;112981.

298. Gallou-Guyot M, Mandigout S, Lacroix J, Ricard D, Buffat S, Archambeau D, et al. Biopsychosocial determinants of visuospatial memory performance according to different spaces. Neurosci Res . 2020.

299. Gallou-Guyot M, Perrochon A, Thomas F, Mandigout S. Réentraîner les seniors à faire deux choses à la fois : le projet INCOME à Limoges. Trayectorias Humanas Trascontinentales. 2021 Nov 4;11(2):488 ko.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

300. Borrego A, Latorre J, Alcañiz M, Llorens R. Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for Virtual Reality-Based Exploration, Navigation, Exergaming, and Rehabilitation. Games Health J. 2018 Jun;7(3):151–6.

301. Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, McDONALD A, Russi GD, Moudgil VK. Longitudinal Modeling of the Relationship between Age and Maximal Heart Rate. Med Sci Sports Exerc. 2007 May;39(5):822–829.

302. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee I-M, et al. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. Med Sci Sports Exerc. 2011 Jul;43(7):1334–59.

303. Plews DJ, Scott B, Altini M, Wood M, Kilding AE, Laursen PB. Comparison of Heart-Rate-Variability Recording With Smartphone Photoplethysmography, Polar H7 Chest Strap, and Electrocardiography. Int J Sports Physiol Perform. 2017 Nov 1;12(10):1324–8.

304. Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. Med Sci Sports Exerc. 1982;14(5):377–81.

305. Herold F, Hamacher D, Törpel A, Goldschmidt L, Müller NG, Schega L. Does squatting need attention?—A dual-task study on cognitive resources in resistance exercise. PLOS ONE. 2020 Jan 21;15(1):e0226431.

306. Canning KL, Brown RE, Jamnik VK, Salmon A, Ardern CI, Kuk JL. Individuals underestimate moderate and vigorous intensity physical activity. PloS One. 2014;9(5):e97927.

307. O'Donovan C, Hussey J. Active video games as a form of exercise and the effect of gaming experience: a preliminary study in healthy young adults. Physiotherapy. 2012 Sep;98(3):205–10.

308. Butte NF, Watson KB, Ridley K, Zakeri IF, McMurray RG, Pfeiffer KA, et al. A Youth Compendium of Physical Activities: Activity Codes and Metabolic Intensities. Med Sci Sports Exerc. 2018 Feb;50(2):246–56.

309. Mullins NM, Tessmer KA, McCarroll ML, Peppel BP. Physiological and Perceptual Responses to Nintendo® Wii Fit™ in Young and Older Adults. Int J Exerc Sci. 2012;5(1):79–92.

310. Braham R, Rosenberg M, Begley B. Can we teach moderate intensity activity? Adult perception of moderate intensity walking. J Sci Med Sport. 2012 Jul;15(4):322–6.

311. Wu P-T, Wu W-L, Chu I-H. Energy Expenditure and Intensity in Healthy Young Adults during Exergaming. Am J Health Behav. 2015 Jul;39(4):556–61.

312. Viana RB, Gentil P, Andrade MS, Vancini RL, de Lira CAB. Is the Energy Expenditure Provided by Exergames Valid? Int J Sports Med. 2019 Sep;40(9):563–8.

313. Çakir-Atabek H, Aygün C, Dokumacı B. Active Video Games Versus Traditional Exercises: Energy Expenditure and Blood Lactate Responses. Res Q Exerc Sport. 2020 Jun;91(2):188–96.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

314. Thayer JF, Åhs F, Fredrikson M, Sollers JJ, Wager TD. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. Neurosci Biobehav Rev. 2012 Feb 1;36(2):747–56.

315. Agbangla NF, Audiffren M, Albinet CT. Use of near-infrared spectroscopy in the investigation of brain activation during cognitive aging: A systematic review of an emerging area of research. Ageing Res Rev. 2017 Sep 1;38:52–66.

316. Shin J, von Lühmann A, Kim D-W, Mehnert J, Hwang H-J, Müller K-R. Simultaneous acquisition of EEG and NIRS during cognitive tasks for an open access dataset. Sci Data. 2018 Feb 13;5(1):180003.

317. Chiarelli AM, Zappasodi F, Pompeo FD, Merla A. Simultaneous functional near-infrared spectroscopy and electroencephalography for monitoring of human brain activity and oxygenation: a review. Neurophotonics. 2017 Aug;4(4):041411.

318. Pinti P, Siddiqui MF, Levy AD, Jones EJH, Tachtsidis I. An analysis framework for the integration of broadband NIRS and EEG to assess neurovascular and neurometabolic coupling. Sci Rep. 2021 Feb 17;11(1):3977.

319. Gallou-Guyot M, Mandigout S, Prado PSA, Marie R, Daviet J-C, Perrochon A. Exergame and cognitive-motor dual-task training in the healthy elderly (INCOME): a study protocol. Eur Rehabil J. 2022 Mar 1;2(1):1–10.

320. Fraser SA, Li KZ-H, Berryman N, Desjardins-Crépeau L, Lussier M, Vadaga K, et al. Does Combined Physical and Cognitive Training Improve Dual-Task Balance and Gait Outcomes in Sedentary Older Adults? Front Hum Neurosci . 2017;10.

321. Bruce H, Lai L, Bherer L, Lussier M, St.-Onge N, Li KZH. The effect of simultaneously and sequentially delivered cognitive and aerobic training on mobility among older adults with hearing loss. Gait Posture. 2019 Jan;67:262–8.

322. Dault MC, Frank JS. Does Practice Modify the Relationship between Postural Control and the Execution of a Secondary Task in Young and Older Individuals? Gerontology. 2004;50(3):157–64.

323. Doumas M, Smolders C, Krampe RTh. Task prioritization in aging: effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. Exp Brain Res. 2008 May;187(2):275–81.

324. Heiden E, Lajoie Y. Games-based biofeedback training and the attentional demands of balance in older adults. Aging Clin Exp Res . 2010 Oct;22(5–6).

325. Melzer I, Oddsson LI. Improving balance control and self-reported lower extremity function in community-dwelling older adults: a randomized control trial. Clin Rehabil. 2013 Mar;27(3):195–206.

326. Westlake KP, Culham EG. Sensory-Specific Balance Training in Older Adults: Effect on Proprioceptive Reintegration and Cognitive Demands. Phys Ther. 2007 Oct 1;87(10):1274–83.

327. Quijoux F, Nicolaï A, Aflalo J, Bertin-Hugault F, Ricard D. Apport de la posturographie dans l'évaluation de l'équilibre de la personne âgée. Prat Neurol - FMC. 2021 Dec;12(4):290–302.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

328. Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. J Exp Psychol. 1935;18(6):643–62.

329. Reitan RM. Validity of the Trail Making Test as an Indicator of Organic Brain Damage. Percept Mot Skills. 1958 Dec 1;8(3):271–6.

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

331. Podsiadlo D, Richardson S. The Timed "Up & Go": A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. J Am Geriatr Soc. 1991;39(2):142–8.

332. Berg K, Wood-Dauphine S, Williams JI, Gayton D. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. Physiother Can . 1989.

333. Park S-H. Tools for assessing fall risk in the elderly: a systematic review and meta-analysis. Aging Clin Exp Res. 2018 Jan;30(1):1–16.

334. Janssen MF, Pickard AS, Golicki D, Gudex C, Niewada M, Scalone L, et al. Measurement properties of the EQ-5D-5L compared to the EQ-5D-3L across eight patient groups: a multi-country study. Qual Life Res Int J Qual Life Asp Treat Care Rehabil. 2013 Sep;22(7):1717–27.

335. Boiché J, Gourlan M, Trouilloud D, Sarrazin P. Development and validation of the 'Echelle de Motivation envers l'Activité Physique en contexte de Santé': A motivation scale towards health-oriented physical activity in French: J Health Psychol . 2016.

336. Yardley L, Beyer N, Hauer K, Kempen G, Piot-Ziegler C, Todd C. Development and initial validation of the Falls Efficacy Scale-International (FES-I). Age Ageing. 2005 Nov 1;34(6):614–9.

337. 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 Feb 1;26(1):11–8.

338. Mackey DC, Manini TM, Schoeller DA, Koster A, Glynn NW, Goodpaster BH, et al. Validation of an Armband to Measure Daily Energy Expenditure in Older Adults. J Gerontol Ser A. 2011 Oct 1;66A(10):1108–13.

339. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. Scand J Stat. 1979;6(2):65–70.

340. Lee S, Lee DK. What is the proper way to apply the multiple comparison test? Korean J Anesthesiol. 2018 Oct;71(5):353–60.

341. Van der Elst W, Van Boxtel MPJ, Van Breukelen GJP, Jolles J. The Stroop Color-Word Test: Influence of Age, Sex, and Education; and Normative Data for a Large Sample Across the Adult Age Range. Assessment. 2006 Mar;13(1):62–79.

342. Bopp KL, Verhaeghen P. Aging and n-Back Performance: A Meta-Analysis. J Gerontol Ser B. 2020 Jan 14;75(2):229–40.

343. Amieva H, Goff ML, Stoykova R, Lafont S, Ritchie K, Tzourio C, et al. Trail Making Test: normative data in a French elderly population from the three Cities Study. Rev Neuropsychol. 2009;1(3):210–20.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

344. Steffen TM, Hacker TA, Mollinger L. Age- and gender-related test performance in community-dwelling elderly people: Six-Minute Walk Test, Berg Balance Scale, Timed Up & Go Test, and gait speeds. Phys Ther. 2002 Feb;82(2):128–37.

345. Barry E, Galvin R, Keogh C, Horgan F, Fahey T. 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 Geriatr. 2014 Feb 1;14:14.

346. Berg KO, Wood-Dauphinee SL, Williams JI, Maki B. Measuring balance in the elderly: validation of an instrument. Can J Public Health Rev Can Sante Publique. 1992 Aug;83 Suppl 2:S7-11.

347. Melzer I. Postural stability in the elderly: a comparison between fallers and non-fallers. Age Ageing. 2004 Sep 22;33(6):602–7.

348. Delbaere K, Close JCT, Mikolaizak AS, Sachdev PS, Brodaty H, Lord SR. The Falls Efficacy Scale International (FES-I). A comprehensive longitudinal validation study. Age Ageing. 2010 Mar;39(2):210–6.

349. Watanabe D, Yoshida T, Watanabe Y, Yamada Y, Kimura M, Group K-KS. Objectively Measured Daily Step Counts and Prevalence of Frailty in 3,616 Older Adults. J Am Geriatr Soc. 2020;68(10):2310–8.

350. Mackey DC, Manini TM, Schoeller DA, Koster A, Glynn NW, Goodpaster BH, et al. Validation of an Armband to Measure Daily Energy Expenditure in Older Adults. J Gerontol Ser A. 2011 Oct 1;66A(10):1108–13.

351. Van Wilder L, Charafeddine R, Beutels P, Bruyndonckx R, Cleemput I, Demarest S, et al. Belgian population norms for the EQ-5D-5L, 2018. Qual Life Res. 2022 Feb 1;31(2):527–37.

352. Schmidt RA, Wrisberg CA. Motor learning and performance: A situation-based learning approach, 4th ed. Champaign, IL, US: Human Kinetics; 2008. xx, 395 p. (Motor learning and performance: A situation-based learning approach, 4th ed).

353. Hodges NJ, Franks IM. Modelling coaching practice: the role of instruction and demonstration. J Sports Sci. 2002 Oct;20(10):793–811.

354. Bloem BR, Grimbergen YAM, van Dijk JG, Munneke M. The “posture second” strategy: A review of wrong priorities in Parkinson’s disease. J Neurol Sci. 2006 Oct 25;248(1):196–204.

355. Bloem BR, Valkenburg VV, Slabbekoorn M, Willemsen MD. The Multiple Tasks Test: Development and normal strategies. Gait Posture. 2001 Dec 1;14(3):191–202.

356. Wajda DA, Sosnoff JJ. Cognitive-motor interference in multiple sclerosis: a systematic review of evidence, correlates, and consequences. BioMed Res Int. 2015;2015:720856.

357. Doumas M, Rapp MA, Krampe RTh. Working Memory and Postural Control: Adult Age Differences in Potential for Improvement, Task Priority, and Dual Tasking. J Gerontol Ser B. 2009 Mar 1;64B(2):193–201.

358. Swan L. Does increasing cognitive load and difficulty level of balance tasks influence postural sway in young adults? [Ph.D.]. [Ann Arbor, United States]; 2004.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

359. 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(3):239–46.

360. Drozdova-Statkevičienė M, Česnaitienė VJ, Pukėnas K, Levin O, Masiulis N. Sway regularity and sway activity in older adults' upright stance are differentially affected by dual task. Neurosci Lett. 2018 Feb 14;666:153–7.

361. Temprado J-J. Are conventional combined training interventions and exergames two facets of the same coin to improve brain and cognition in healthy older adults? A data-based viewpoint (Preprint) . JMIR Serious Games; 2022.

362. Sternberg SA, Schwartz AW, Karunananthan S, Bergman H, Mark Clarfield A. The Identification of Frailty: A Systematic Literature Review. J Am Geriatr Soc. 2011;59(11):2129–38.

363. Storti KL, Pettee KK, Brach JS, Talkowski JB, Richardson CR, Kriska AM. Gait speed and step-count monitor accuracy in community-dwelling older adults. Med Sci Sports Exerc. 2008 Jan 1;40(1):59–64.

364. Picorelli AMA, Pereira LSM, Pereira DS, Felício D, Sherrington C. Adherence to exercise programs for older people is influenced by program characteristics and personal factors: a systematic review. J Physiother. 2014 Sep 1;60(3):151–6.

365. Lord SR, Castell S, Corcoran J, Dayhew J, Matters B, Shan A, et al. The effect of group exercise on physical functioning and falls in frail older people living in retirement villages: a randomized, controlled trial. J Am Geriatr Soc. 2003 Dec;51(12):1685–92.

366. Sailer M, Hense J, Mandl H, Klevers M. Psychological Perspectives on Motivation through Gamification. 2013;11.

367. Cyarto EV, Brown WJ, Marshall AL. Retention, adherence and compliance: Important considerations for home- and group-based resistance training programs for older adults. J Sci Med Sport. 2006 Oct 1;9(5):402–12.

368. Murman DL. The Impact of Age on Cognition. Semin Hear. 2015 Aug;36(3):111–21.

369. Ballesteros S, Mayas J, Prieto A, Toril P, Pita C, Laura P de L, et al. A randomized controlled trial of brain training with non-action video games in older adults: results of the 3-month follow-up. Front Aging Neurosci. 2015 Apr 14;7:45.

370. Eggenberger P, Schumacher V, Angst M, Theill N, de Bruin ED. 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. Clin Interv Aging. 2015 Aug 17;10:1335–49.

371. Coutton V. Évaluer la dépendance à l'aide de groupes iso-ressources (GIR):une tentative en France avec la grille aggir. Gerontol Soc. 2001;2499(4):111–29.

372. Gavriilidou NN, Pihlsgård M, Elmståhl S. Anthropometric reference data for elderly Swedes and its disease-related pattern. Eur J Clin Nutr. 2015 Sep;69(9):1066–75.

373. Klein M, Ponds RWHM, Houx PJ, Jolles J. Effect of test duration on age-related differences in stroop interference. J Clin Exp Neuropsychol. 1997 Feb 1;19(1):77–82.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

374. Wolff W, Sieber V, Bieleke M, Englert C. Task duration and task order do not matter: no effect on self-control performance. Psychol Res. 2021 Feb 1;85(1):397–407.

375. Gallou-Guyot M, Mandigout S, Combourieu-Donnezan L, Bherer L, Perrochon A. Cognitive and physical impact of cognitive-motor dual-task training in cognitively impaired older adults: An overview. Neurophysiol Clin. 2020 Oct 26;50(6):441–53.

376. Perrochon A, Borel B, Istrate D, Compagnat M, Daviet J-C. Exercise-based games interventions at home in individuals with a neurological disease: A systematic review and meta-analysis. Ann Phys Rehabil Med. 2019 May;S1877065719300600.

377. Dalmazane M, Gallou-Guyot M, Compagnat M, Magy L, Montcuquet A, Daviet J-C, et al. Effects on gait and balance of home-based active video game interventions in persons with multiple sclerosis: a systematic review. Mult Scler Relat Disord. 2021 Mar;102928.

378. Gallou-Guyot M, Nuic D, Mandigout S, Compagnat M, Welter ML, Daviet JC, et al. Effectiveness of home-based rehabilitation using active video games on quality of life, cognitive and motor functions in people with Parkinson's disease: a systematic review. Disabil Rehabil. 2022 Jan 4;1–12.

379. Amiri Z, Sekhavat YA, Goljaryan S, Roohi S. KeepStep: Accommodating user diversity through individualized, projection-mapping based exergames for rehabilitation in people with multiple sclerosis. Multimed Tools Appl . 2022.

380. Peretz H. Les méthodes en sociologies - Introduction. Reperes. 2004;3–10.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Documentation supplémentaire en ligne

Guide complet d'installation du jeu :

https://drive.google.com/file/d/1VqgfzsNx9sFEBjQXsRrGBbDK8lKciFvy/view?usp=sharing

Guide complet des consignes et des règles du jeu :

https://drive.google.com/file/d/1AC6ajWNarQaoVr0cXbV-dGWtVKzXUxv5/view?usp=sharing

Programme d'entraînement incrémental sur 12 semaines :

https://drive.google.com/file/d/1JtMrS7LckQMD9pyAaSuHZ8hmf4_8AfWw/view?usp=sharing

Consentement écrit :

https://drive.google.com/file/d/1IMB74E3v4jjLiJdted6-5RtkqGO9XGJx/view?usp=sharing

Notice d'information :

https://drive.google.com/file/d/18MUeCdI9GZ5z213VnRLqkiiQ4K5wHxHS/view?usp=sharing

Avis favorable du comité de protection des personnes :

https://drive.google.com/file/d/1RPWsH7iCrXDxPKh93VA2uzGSQHK_-KzF/view?usp=sharing

Vidéo de présentation du dispositif de jeu :

https://www.youtube.com/watch?v=Wiaq4-_Fj7w

Vidéo de démonstration du protocole du projet INCOME :

https://www.youtube.com/watch?v=yeb-704OSb8

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexes

Annexe 1. Revue systématique de revues systématiques relatives aux effets des entraînements en DT et des exergames sur les capacités cognitives, motrices et de DT chez les séniors 158
Annexe 2. Intensité physique mesurée et ressentie lors d'un entraînement en ST, en DT, et via un exergame 159
Annexe 3. Protocole d'étude du projet INCOME 160
Annexe 4. Retour d'expérience des acteurs de notre exergame 161

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 1. Revue systématique de revues systématiques relatives aux effets des entraînements en DT et des exergames sur les capacités cognitives, motrices et de DT chez les séniors

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Ageing Research Reviews 63 (2020) 101135

Contents lists available at ScienceDirect

Ageing Research Reviews

journal homepage: www.elsevier.com/locate/arr

Review

Effects of exergames and cognitive-motor dual-task training on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults: An overview

M. Gallou-Guyot[a], S. Mandigout[a], L. Bherer[b,c,d], A. Perrochon[a,*]

[a] HAVAE, EA 6310, Université de Limoges, Limoges, France
[b] Department of Medicine, Université de Montréal, Montreal, Canada
[c] Research Centre, Montreal Heart Institute, Montreal, Canada
[d] Research Centre, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, Montreal, Canada

ARTICLE INFO

Keywords:
Dual-task training
Exergame
Healthy older adults
Cognitive functions
Physical functions

ABSTRACT

This overview aims to summarize the effectiveness of cognitive-motor dual-task and exergame interventions on cognitive, physical and dual-task functions in healthy older adults, as well as the feasibility, safety, adherence, transfer and retention of benefits of these interventions. We searched for systematic reviews or meta-analyses assessing the effects of cognitive-motor dual-task and exergame interventions on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults through eight databases (CDSR (Cochrane), MEDLINE (PubMed), Scopus, EMBASE, CINAHL, PsycINFO, ProQuest and SportDiscus). Two reviewers performed the selection, data extraction and risk of bias evaluation independently (PROSPERO ID: CRD42019143185). Eighteen reviews were included in this overview. Overall, positive effects of cognitive-motor dual-task interventions on cognitive, physical and dual-task functions, as well as exergames on cognitive functions only, were observed in cognitively healthy older adults. In contrast, the effects of exergames on physical functions are more controversial, and their effects on dual-task functions have not been studied. The feasibility, safety, adherence, transfer and retention of benefits for both intervention types are still unclear. Future studies should follow more rigorous methodological standards in order to improve the quality of evidence and provide guidelines for the use of cognitive-motor dual-task and exergame interventions in older adults.

1. Introduction

Aging is associated with a high risk of physical and cognitive impairment, which contributes to disability and possible loss of independence (Anton et al., 2015). A cognitive-motor dual-task (CMDT) is defined as the simultaneous completion of a cognitive and a motor task (Montero-Odasso et al., 2012; Yogev-Seligmann et al., 2008). Cognitive-motor interference is defined as the overwhelming of attention abilities, resulting in a decrease in one or both tasks' performances. Aging is associated with increased risk of falling with the decrease in motor and cognitive functions, or the increase of cognitive-motor interference (Montero-Odasso et al., 2012; Yogev-Seligmann et al., 2008). Thus, the maintenance of cognitive, physical and CMDT capabilities seems to be an important way of preserving autonomy through aging.

Many recent studies have used interventions requiring the realization of a motor and a cognitive task, performed sequentially or simultaneously to improve CMDT functions (Tait et al., 2017). Exergames (EGs) are increasingly being developed and are often studied together with other CMDT modalities (Schoene et al., 2014; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). EGs are videogames played on a digital device, including a wide range of interfaces (Baranowski et al., 2008) that require physical activity (Vázquez et al., 2018) as well as cognitive tasks when played (e.g. considering the continuous feedback and making quick decisions) (Larsen et al., 2013). EGs are characterized by their potential ability to motivate older participants to practice through an attractive, interactive way (Skjæret et al., 2016).

Many reviews have tried to synthesize the results of CMDT and EG interventions (Agmon et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019), but those reviews show great heterogeneity related to intervention (content, duration and modality), comparison (active or inactive control groups) and outcome (cognitive, physical or dual-task functions). Moreover, the results are controversial as interventions were found to

* Corresponding author at: Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire Handicap, Activités Vieillissement, Autonomie, Environnement (HAVAE, EA 6310), Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, FR–87000, Limoges, France.
E-mail address: anaick.perrochon@unilim.fr (A. Perrochon).

https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101135
Received 4 February 2020; Received in revised form 29 July 2020; Accepted 30 July 2020
Available online 05 August 2020
1568-1637/ © 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

be effective (Agmon et al., 2014), ineffective (Donath et al., 2016) and unclear (Stojan and Voelcker-Rehage, 2019) across different studies. A recent overview has summarized the positive effects of EGs on physical functions in cognitively healthy older adults (Reis et al., 2019), but the effectiveness of EG interventions on cognitive and dual-task functions in older adults is still to be determined.

At the same time, most intervention studies assess feasibility, long term effects, safety and adherence, but this information seems unclear for CMDT and EG interventions in older adults (Ghai et al., 2017; Kappen et al., 2019).

This overview is aimed at 1) summarizing the effects of CMDT and EG interventions on cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults, and 2) determining the feasibility, safety, adherence, transfer and retention of improvements in these interventions.

2. Methods

2.1. Design and protocol

We used the definition of "systematic review" from a Cochrane guide (Chandler et al., 2017). In order to perform this overview, we used a protocol established prior to the conduct of the review that was registered on PROSPERO (registration ID: CRD42019143185). The design and the protocol of this overview were established following authors' recommendations (Pollock et al., 2016), checklist (Bougioukas et al., 2018), Cochrane guidelines (Pollock et al., 2018) and the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Moher et al., 2009).

2.2. Search strategy

In order to gather the maximum amount of literature, and not to miss any reviews, we conducted our overview through different online databases: the Cochrane Database of Systematic Reviews, MEDLINE (PubMed search engine), Scopus, EMBASE, CINAHL, PsycINFO, ProQuest and SportDiscus. We also searched for grey literature through the reference list of included reviews, and consulted content experts (Louis Bherer and Bradford J. McFadyen). We performed the entire search from June to August 30, 2019. We searched the titles, keywords and abstracts of database entries by using a keyword search: older adults AND cognitive-motor dual-task training OR exergame AND physical OR cognitive OR dual-task functions (see details in Appendix A).

2.3. Eligibility criteria and selection

Two authors (MGG and AP) conducted the eligibility analysis and selection of reviews for inclusion in this overview independently; in case of disagreement or ambiguity, a third author decided (SM). Concerning the study design, the inclusion criteria were systematic reviews or meta-analyses, including randomized controlled trials (RCTs) or non-randomized studies of interventions (NRSIs), and full scientific papers all written in English. To define the study content's eligibility, we used the PICO framework (Population, Intervention, Comparison, Outcome) (Schardt et al., 2007). The inclusion criteria were systematic reviews assessing as primary outcome the CMDT's effect on cognitive, physical or dual-task functions and EG interventions compared to cognitive or motor single-task trainings, fall prevention programs or no interventions conducted on cognitively healthy older adults. Fall prevention programs are trainings following recommendations for the prevention of falls in older adults (Nelson et al., 2007). The physical outcomes encompass motor capacities (strength, gait, mobility, postural control and balance), and falls. The cognitive outcomes encompass learning, memory, executive functions, processing speed, visuospatial capabilities, attention, reaction time and overall cognition. The dual-task functions encompass any combined cognitive and physical functions performed simultaneously. The exclusion criteria were: i) non-systematic reviews; ii) reviews integrating participants with neurological diseases (e.g. -motor training or passive video games. After removing duplicates and scanning titles and abstracts, eligible studies were screened for inclusion by thorough reading.

2.4. Data extraction

Two authors (MGG and AP) independently extracted data from the reviews included: number of primary studies included, objectives, populations, interventions, comparisons, outcomes, conclusion, risk of bias, feasibility (centre or home based, grouped or individual interventions, supervision), safety, adherence, transfer and retention of benefits. In case of disagreement or ambiguity, a third author decided (SM).

2.5. Study quality assessment

Two authors (MGG and AP) independently rated the methodology quality of the reviews included using the AMSTAR-2 critical appraisal tool (Shea et al., 2017). Any disagreements were recorded to assess the agreement rate and then resolved by a third author (SM).

2.6. Overlap

The different systematic reviews included in this overview may have used the same primary studies, at least partially; this is called overlap. It is necessary to calculate the corrected covered area (CCA) (Pieper et al., 2014) to avoid the risk of interpretation and conclusion errors, giving disproportionate power to multiple primary studies.

3. Results

3.1. Characteristics of the reviews included

The initial database search revealed 4243 potentially relevant reviews. After duplicate reviews were removed, 2815 titles and abstract were screened. A total of 62 reviews were assessed as full text, and 18 were included in this overview (Fig. 1). The list of excluded reviews and reasons for exclusion are available in Appendix B. The eighteen reviews (Agmon et al., 2014; Bleakley et al., 2015; Choi et al., 2017; Donath et al., 2016; Joubert and Chainay, 2018; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Levin et al., 2017; Molina et al., 2014; Neri et al., 2017; Plummer et al., 2015; Rodrigues et al., 2014; Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018; Wang et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014; Zhu et al., 2016) were published in the last six years, including eight reviews with additional meta-analyses (Donath et al., 2016; Neri et al., 2017; Plummer et al., 2015; Rodrigues et al., 2014; Taylor et al., 2018; Wang et al., 2015; Zhu et al., 2016). The CCA value was 0.05, so the overlap can be considered as slight (see the details of overlap in Appendix C).The eighteen reviews included 203 singular primary articles (i.e. which did not overlap).

3.1.1. Participants and interventions

The characteristics of the 18 systematic reviews included are summarized in Table 1. These reviews included cognitively healthy older adults (Joubert and Chainay, 2018; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Levin et al., 2017; Molina et al., 2014; Rodrigues et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Wang et al., 2015; Zhu et al., 2016), or with balance impairment or history of falls (Agmon et al., 2014; Bleakley et al., 2015; Choi et al., 2017; Donath et al., 2016; Neri et al., 2017; Plummer et al., 2015; Schoene et al., 2014; Taylor et al., 2018; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). Participants were 60 years old or older, with average ages in primary studies ranging from 60 (Stojan and Voelcker-Rehage, 2019) to 91 years old (Plummer et al., 2015).

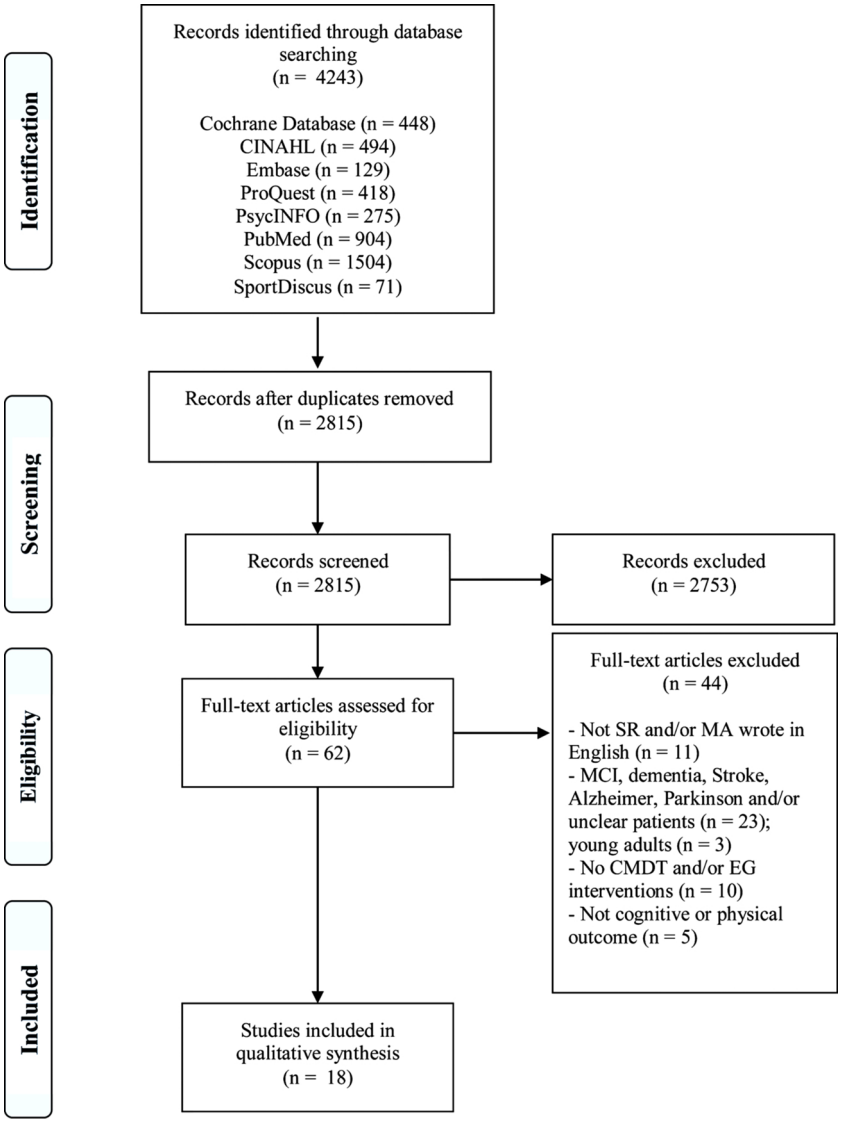


Fig. 1. Selection of systematic reviews.
SR: systematic review; MA : meta-analysis ; CMDT : cognitive-motor dual-task; EG : exergame; MCI : mild cognitive impairment.

Eight reviews did not report the mean age of participants within the studies they included (Joubert and Chainay, 2018; Molina et al., 2014; Neri et al., 2017; Rodrigues et al., 2014; Schoene et al., 2014; Taylor et al., 2018; Wang et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). After examination of the overlap, so by considering each study included in the reviews only once, the actual number of participants included was 28446.

Seven of the reviews included assessed the efficacy of CMDTs (Agmon et al., 2014; Joubert and Chainay, 2018; Levin et al., 2017; Plummer et al., 2015; Wang et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014; Zhu et al., 2016), and eleven assessed EG interventions (Bleakley et al., 2015; Choi et al., 2017; Donath et al., 2016; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Neri et al., 2017; Rodrigues et al., 2014; Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018). Reviews were classified according to their actual interventions, not their titles (e.g. Schoene et al., 2014). CMDT interventions systematically included a cognitive (attention, memory, executive functions, processing speed, visuospatial capabilities or overall cognition) and a physical task (strength, gait, mobility, postural control or balance training). EG interventions used mostly commercial video games (Wii ®, Kinect ®, Dance Dance Revolution ® and virtual reality equipment). Studies amongst reviews sometimes used non-commercial, specially designed games, such as cybercycle (Larsen et al., 2013; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019), cyberstep (Neri et al., 2017; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019) or computerized balance training (Bleakley et al., 2015; Schoene et al., 2014; Taylor et al., 2018).

The characteristics of the interventions are summarized in Table 1. Program characteristics were heterogeneous within and between each review included, with respect to frequency (1–3 times a week), length (15–90 min) and duration (once to 96 weeks). The cognitive and physical tasks were either asked simultaneously only (i.e., dual-task training) (Bleakley et al., 2015; Choi et al., 2017; Donath et al., 2016; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Neri et al., 2017; Rodrigues et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018) or both simultaneously and sequentially (i.e., sequential cognitive-motor training) (Joubert and Chainay, 2018; Levin et al., 2017; Plummer et al., 2015; Zhu et al., 2016) within reviews; some did not specify this modality (Agmon et al., 2014; Schoene et al., 2014; Wang et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). Sequential cognitive-motor trainings combined physical and cognitive separately (e.g., Oswald et al., 2006, cited in Zhu et al., 2016). The mode of release was reported in six reviews: CMDT interventions were mostly distributed in groups (Agmon et al., 2014; Plummer et al., 2015; Zhu et al.,

Table 1
Characteristics of included systematic reviews.

Review First author, year Country	**Objectives** 1) Primary 2) Secondary	**Included literature :** Review design (N) Primary studies design (N)	**Population :** N (Exp / Ctrl) Age (range or mean) Characteristics (N)	**Interventions** Experimental or control group, content (N)	**Modalities :** Seq / Sim Grp / Ind Center / home Duration min Duration max	**Outcomes** Type, functionsassessed	**Conclusions** 1) Primary objective 2) Secondary objective	**RoB** Scale , score or criteria (mean ± SD) or [range] Appreciation
COGNITIVE-MOTOR DUAL-TASK TRAINING								
Cognitive outcome								
Joubert, 2018 France	1) Effects of CMDT compared with cognitive or physical STT on cognition 2) Assess retention and transfer	SR (52) RCT (36), NRSI (16)	20512 (n.r.) n.r. HE (52)	**Exp** : CMDT (combined cognitive & physical training) (7), EG (Wii) (1) **Ctrl** : NI (n.r.) and/or active : physical STT (resistance, aerobic, stretching, balance) (10), cognitive STT (speed processing, attention, memory, visuospatial abilities, task switching) (31)	Sim (2), Seq (6) n.r. n.r. 60 min, 1x 90min, 1x/w, 30w	**Cognitive** : attention, PS, memory, EF, visuospatial performance	1) Improving cognition, CMDT are superior to cognitive and physical STT 2) Retention (4) and transfer (1) were unclear	PEDro (/10) [4-10], for DT training [5-11] n.r.
Zhu, 2016 China	1) Effects of CMDT compared with cognitive or physical STT on cognition	SR (20) - MA (20) RCT (14), NRSI (6)	2667 (1667 - 1000) [65 - 82] HE (20)	**Exp** : EG (3), CMDT (20), combining a cognitive task (multidomain (11), single domain (4)) with a physical task (multicomponent exercises (12), aerobic (6), strength and balance (1)) **Ctrl** : education (3), NI (11), and/or STT (3)	Sim (6), Seq (14) Grp (10), Ind (3), mixed (4) n.r. 30 min, 3x/w, 6w 10-60min, 3-11x/w, 96 w	**Cognitive** : global cognition, memory, EF, attention, PS, visuospatial performance	1) Improving cognition, CMDT are superior to NI, TI and physical STT; equivalent to cognitive STT	Modified PEDro (/9) 6,3 ± 1,3 [2-9] 7 low, 13 high risk
Physical outcome								
Wang, 2015 China	1) Effects of CMDT compared with STT or NI on falls	SR (30) - MA (30) RCT (10), NRSI (20)	1206 (n.r.) n.r. HE (30)	**Exp** : CMDT (n.r.) **Ctrl** : NI or STT (n.r.)	n.r. n.r. n.r. n.r.	**Physical** : gait, balance, falls, reaction time	1) Improving gait, balance and preventing falls, CMDT are superior to STT and NI 2) No serious adverse events	PEDro (/10) 5.4 ± 1.4 [3-8] 1 low, 21 moderate, 8 high risk
Cognitive and Physical outcome								
Levin, 2017 Israel	1) Effects of CMDT on cognitive and motor functions	SR (19) RCT (6), NRSI (13)	1226 (843 / 383) [66 - 82] HE (19)	**Exp** : STT (6), combined exercise training (aerobic, balance,resistance) (4), CMDT (10) (aerobic, balance, and resistance training with flexibility and memory tasks), **Ctrl** : NI and/or active STT (n.r.)	Sim (6), Seq (3) n.r. n.r. 7 sets, 8 rep, 2x/w, 6w 60min, 2x/w, 24w	**Physical** : mobility, gait, balance, strength, psychomotor tasks, aerobic fitness **Cognitive** : PS, EF, attention, DT cost	1) Improving physical functions, CMDT are equivalent to MMDTT; improving cognitive functions, CMDT are superior to MMDTT (psychomotor speed, processing speed, attention and DT cost)	Jadad (/5) [1-4] n.r.
Dual-task outcome								
Plummer, 2015 USA	1) Effects of CMDT compared with STT on DT gait performance	SR (21) - MA (14) RCT (15), NRSI (6)	911 (n.r.) [71 - 91] HE (13), BI, fall (5), frail (2)	**Exp** : MMDTT (4) and CMDT (9), combining a physical task (walking, balance, coordination, stretching, tai-chi, step, aerobic, strength) with a physical or a cognitive task (comprehension, arithmetic, verbal fluency, working memory) **Ctrl** : education (1), NI (11), or active : STT or FPP (9)	Sim (9), Seq (1) Grp (12), Ind (7), mixed (2) n.r. 45 min, 3x/w, 4w 60min, 1x/w, 25w	**Physical :** Gait under DT conditions	1) Improving gait speed, CMDT are superior to NI and TI, and equivalent to STT	Downs & Black (/25) 16,8 [12-21] 4 high, 13 good, 4 low quality
Wollesen, 2014 Germany	1) Effects of CMDT compared with STT on DT performances	SR (13) RCT (6), NRSI (7)	387 (n.r.) n.r. HE (11), fall (2)	**Exp** : CMDT (9), combining a physical (balance, strength, walking) and a cognitive task (memory, verbal, visuospatial, music), VR (2) **Ctrl** : STT (balance, walking) (5)	n.r. n.r. n.r. 60min, 3x 60min, 1x/w, 48w	**Physical** : postural control, mobility, gait **Cognitive** : PS, visuospatial performance, EF	1) Improving DT standing performance, CMDT are superior to STT; improving DT walking performance, CMDT are equivalent to STT	Modified Van Tulder (/12) [3-11] 5 High quality

(*continued on next page*)

Table 1 (*continued*)

Agmon, 2014 Israel	1) Effects of different interventions on DT postural control	SR (22) RCT (16), NRSI (6)	730 (387 / 343) ≥ 60 HE (6), fall (7)	**Exp** : CMDT (13), combining a physical (walking, balance, gait, agility) and a cognitive task (calculation, verbal and working memory), STT (postural) (9) **Ctrl** : education (4), NI (3) and/or STT (6)	n.r. Grp (14), Ind (8) n.r. 45min, 1x/w, 4w 60min, 1x/w, 25w	**Physical** : postural control, balance and gait under DT	1) Improving DT postural control, CMDT are superior to STT	Portney and Watkins (n.r.) [1-4] n.r.
EXERGAME								
Cognitive outcome								
Stojan, 2019 Germany	1) Effects of EG on cognitive domains (neurophysiological outcomes mostly)	SR (15) RCT (12), NRSI (3)	750 (n.r.) [60 - 85] HE (15)	**Exp** : Kinect (4), VR (3), dance videogame (5) including DDR (2), Cybercycle (2), Cyberstep (2), Wii (1) **Ctrl** : NI (n.r.) and/or active STT (n.r.)	Sim (15) n.r. n.r. 30min, 2x/w, 6w 60min, 2x/w, 26w	**Cognitive** : memory, EF, PS, visuospatial performance	1) Improving cognitive and brain functions, EG are effective (small and strongly varying positive effects); improving EF, EG are similar or slightly superior to TI	CCRT n.r. 3 High, 4 moderate, 6 low, 2 n.r.
Physical outcome								
Taylor, 2018 New Zealand	1) Effects of EG on physical functions 2) Assess the safety, game appeal, and usability	SR (18) - MA (10) RCT (18)	765 (n.r.) n.r. HE (13), BI or RoF (3), unclear (2)	**Exp** : Wii (11), pressure-sensitive systems (5), Kinect (1), VR (1) **Ctrl** : placebo (2), NI (9) and/or FPP (16)	Sim (18) Grp (2), Ind (16) Home (1), center (17) Mean : 40 min, 2-3x/w, 8w	**Physical** : mobility, balance	1) Improving balance and mobility, EG are superior to NI and TI 2) Safe when supervised, good adherence, enjoyed	CCRT n.r. 4 low, 14 high or unclear
Choi, 2017 South Korea	1) Effects of EG on fall	SR (25) RCT (6), NRSI (19)	752 (525 / 227) > 60 HE (19), BI (6)	**Exp** : Wii (14), Kinect (5), SensBalance Fitness Board (2), DDR (1), others (3) **Ctrl** : NI (n.r.) and/or active : STT or FPP (n.r.)	Sim (25) n.r. Home (11), Center (14) 30min, 3x/w, 3w 45min, 3x/w, 15w	**Physical** : strength, RoF, balance, gait, mobility **Cognitive** : cognitive functions (not specified)	1) Improving balance, EG are superior to NI, and equivalent to TI	n.r. n.r. n.r.
Neri, 2017 Brazil	1) Effects of EG compared with NI or TI on fall	SR (28) - MA (6) RCT (28)	1121 (n.r.) n.r. HE (28), fall (2), prefrail (1)	**Exp** : Wii (15), VR (4), Cyberstep (3), dance videogame (2), Kinect (1), others (4) **Ctrl** : NI (12) or FPP (16)	Sim (28) n.r. n.r. 40 min, 3x/w, 2w 60 min, 1x/w, 20w	**Physical :** balance, strength, reaction time, mobility, RoF	1) Improving mobility and balance, EG are superior to NI; improving balance and RoF, EG are superior to TI	CCRT n.r. n.r.
Donath, 2016 Switzerland	1) Effects of EG compared with TI or NI on balance	SR (18) - MA (18) RCT (15), NRSI (3)	619 (n.r.) 76 ± 5 HE (15), fall (3)	**Exp** : Wii (12), VR (5), DDR (1) **Ctrl** : NI (13), and/or active : STT or FPP (9)	Sim (18) n.r. n.r. < 45min, 2x/w, 3w 60min, 1x/w, 20w	**Physical** : balance, mobility, postural control	1) Improving mobility and balance, EG are superior to NI; improving standing balance and functional mobility, EG are inferior to TI	PEDro (/10) [4-8] n.r.
Molina, 2014 Brazil	1) Effects of EG on physical functions	SR (13) RCT (10), NRSI (3)	487 (n.r.) n.r. HE (4)	**Exp** : Wii (8), dance video game (2), balance or step training (1), computer games (2). EG only (7) or EG + physical activity (6) **Ctrl** : placebo (1), NI (6) and/or active : STT or FPP (9)	Sim (13) Grp (2), Ind (6), unclear (5) Additional home (1) 30min, 2x/w, 3w 30min, 2x/w, 12w	**Physical** : mobility, balance, RoF, strength, postural control, reaction time, gait	1) EG did not increase physical functions 2) Positive motivational aspect with EG	PEDro (/10) 5.6 ± 1.3 [4-8] n.r.
Rodrigues, 2014 Brazil	1) Effects of EG on musculoskeletal functions	SR (16) - MA (4) RCT (14), NRSI (2)	532 (268 / 264) n.r. HE (16)	**Exp** : Wii (10), Dance video game (2), VR (1), others (3) **Ctrl** : NI (10), and/or physical activity (7)	Sim (16) n.r. n.r. 15min, 2x/w, 3w ? min, 1x/w, 20w	**Physical** : balance, mobility, strength, falls efficacy scale, gait, fear of falling	1) EG did not increase functional mobility nor the fear of falls	Jadad (/5): [1-3] 9 low, 7 high
Laufer, 2014 Israel	1) Effects of EG (Wii) compared with TI or NI on balance control	SR (7) RCT (7)	285 (126 / 159) [61 - 86] HE (7)	**Exp** : Wii Mote (1), Wii Balance Board (7) **Ctrl** : placebo (1), NI (3) and/or active : FPP (5)	Sim (7) Grp (1), Ind (6) n.r. 40min, 2x/w, 6w 60 min, 1x/w, 20w	**Physical** : standing/walking balance, postural sway, fitness, strength, falls	1) Improving balance, EG are superior to NI and equivalent to TI; and feasible	PEDro (/10) 5.6 ± 0.8 [5-7] n.r.
Larsen, 2013 Denmark	1) Effects of EG on physical outcomes	SR (7) RCT (7)	311 (n.r.) [73 - 86] HE (7)	**Exp :** Wii (4), DDR (1), Cybercycle (1), other (1) **Ctrl :** NI (4) and/or active : FPP (5), tai-chi (1)	Sim (7) n.r. n.r. 3w 20w	**Physical** : balance, mobility, strength	1) Improving physical functions, EG are superior to NI, and equivalent to TI 2) Additional cognitive effect of EG (assessed in 1 study)	CCRT n.r. n.r.
Cognitive and Physical outcome								
Bleakley, 2015 United Kingdom	1) Effects of EG on physical and cognitive functions 2)	SR (12) RCT (5), NRSI (7)	455 (n.r.) > 65 HE (9), fall (1), BI (1)	**Exp** : VR (4), Wii (4), computerized balance training (3), dance mat (1)	Sim (12) n.r. n.r. 20 min, 2x/w, 4w 90 min, 2x/w, 12w	Physical: postural control, balance strength, fallsCognitive: global	1) Improving physical and cognitive functions, EG are effective 2) EG are safe; the	CCRT n.r. n.r.

(*continued on next page*)

Table 1 (*continued*)

Schoene, 2014 Netherlands	Assess the compliance, enjoyment and adverse events 1) Effects of EG[#] compared with TI on falls and RoF	SR (37) n.r.	1066 (n.r.) n.r. HE (21), functional impairment (16), fall or BI (6)	**Ctrl** : education (1), NI (2) and/or active : STT or FPP (5) **Exp** : Wii Balance Board (16), WiiMote (10), pressure-sensitive platforms (7), force plates with VR (3), tillable platforms (2), Kinect (1), EyeToy (1), Fovea (1), walks film projected onto a screen (1), others (2) **Ctrl** : NI (9) and/or active (9)	n.r. n.r. Center (34), home (2), mixed (1) 30min, 3x/w, 3w 60min, 2x/w, 12w	cognition, EF, memory, attention, PS **Physical** : step, balance, mobility, falls, balance, postural control, strength **Cognitive** : attention, EF, global cognition	optimal dose, enjoyment and adherence remains unclear 1) Improving physical and cognitive fall risk factors, EG[#] are equivalent to TI; effects on falls remains unclear	Modified Downs and Black (/27) 16.8 ± 4.5 [5, 24] n.r.

BI : balance impairment; CCRT : Cochrane Collaborations RoB Tool; CMDT : cognitive-motor dual-task; Ctrl : control group; DDR : dance-dance revolution; DT : dual-task; EF : executive functions; EG : exergame ; Exp : experimental group; FPP: fall prevention programs; Grp : group; HE : healthy elderly; Ind : individual; MA : meta-analysis; min : minutes; MMDTT: motor-motor dual-task training; NI : no intervention; NRSI : non-randomized studie of interventions ; n.r. : not reported; PEDro : Physiotherapy Evidence Database; PS : processing speed; QOL : quality of life; RCT : randomized controlled trial; RoB : risk of bias; RoF : risk of fall; SR : systematic review; Seq : sequential; Sim : simultaneous; STT : single-task training; VR : virtual reality; w : week; # CMDT,requalified as EG.

2016), and EGs were mostly distributed individually (Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Taylor et al., 2018). The setting was only reported in three EG reviews (Choi et al., 2017; Schoene et al., 2014; Taylor et al., 2018) and interventions were mostly not home-based (gymnasium, clinical or research centre).

CMDTs and EGs were compared to inactive and active control groups (single-task training or fall prevention programs) (Agmon et al., 2014; Bleakley et al., 2015; Choi et al., 2017; Donath et al., 2016; Joubert and Chainay, 2018; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Neri et al., 2017; Plummer et al., 2015; Rodrigues et al., 2014; Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018; Wang et al., 2015; Zhu et al., 2016), with or without placebo (Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Taylor et al., 2018) or education (Agmon et al., 2014; Bleakley et al., 2015; Plummer et al., 2015; Zhu et al., 2016).. The content of active control groups is similar, involving one or more functions training in the same domain (cognitive or motor) carried out sequentially and separately (e.g., "fall prevention programs" include muscle strength, mobility, balance and reaction time exercises)

3.2. Results of individual studies

The efficacy of CMDT and EG interventions on cognitive, physical and dual-task functions, and their comparison with active or inactive control groups, are summarized in Table 1 and illustrated in Fig. 2.

3.2.1. Effectiveness of CMDT interventions on cognitive, physical and dual-task functions

Compared to fall prevention programs, single-task training, active and inactive control, two reviews found CMDT interventions superior (Joubert and Chainay, 2018; Levin et al., 2017), and one was found equivalent (Zhu et al., 2016) in improving cognitive functions. Cognitive outcomes varied, including attention, memory, executive functions, processing speed, visuospatial capabilities and overall cognition (Table 1).

Compared to fall prevention programs, single-task training, motor-motor dual-task training, active and inactive control, one review found CMDT interventions superior (Wang et al., 2015), and one was found equivalent (Levin et al., 2017) in improving physical functions. Physical outcomes varied, including motor capacities (strength, gait, mobility, postural control and balance), and falls (rates, risk factors, fear) (Table 1).

Three reviews assessed the effectiveness of CMDT interventions on dual-task capabilities in healthy older adults (Agmon et al., 2014; Plummer et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014), and found superior effects compared to single-task training in improving postural control, balance, mobility and gait during dual-task conditions (Table 1).

It is worth noting that, for all the functions studied, CMDT interventions' effects were greater than for the inactive control group, and greater than or equal to the active control group.

3.2.2. Feasibility, safety, adherence, transfer and retention of CMDT interventions

One review reported the supervision in CMDT interventions, and the result was unclear (Agmon et al., 2014). The assessment of the safety of interventions was conducted through the occurrence of adverse events. The only review evaluating CMDT intervention safety reported no serious adverse events (Wang et al., 2015). Adherence has rarely been studied in CMDT interventions, but presented acceptable compliance and drop-out rates (Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). The assessment of the transfer of benefits encompasses several factors, and was only reported in four CMDT intervention reviews (Agmon et al., 2014; Joubert and Chainay, 2018; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014; Zhu et al., 2016). CMDT interventions induced positive (Joubert and Chainay, 2018) or unclear (Zhu et al., 2016) effects on daily living

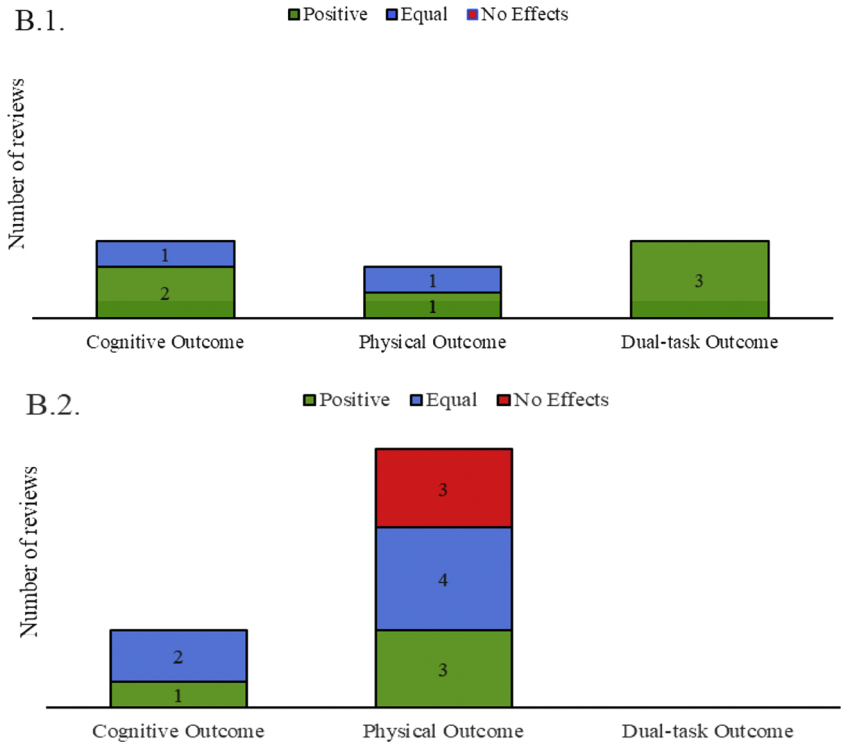


Fig. 2. Effects of cognitive-motor dual-task (CMDT) (1) and exergame (EG) (2) interventions on cognitive, physical or dual-task outcomes.

activities and mixed effects on tasks other than those trained for (Agmon et al., 2014; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). Long-term benefits were only reported in three CMDT intervention reviews (Agmon et al., 2014; Joubert and Chainay, 2018; Zhu et al., 2016). Benefits persisted from two weeks (Agmon et al., 2014) to five years (Joubert and Chainay, 2018).

3.2.3. Effectiveness of EG interventions on cognitive and physical functions

One review found EG interventions effective on cognitive functions (Bleakley et al., 2015). Two reviews found that EG interventions were equivalent compared to fall prevention programs, single-task training and active and inactive controls (Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019). Cognitive outcomes varied, including attention, memory, executive functions, processing speed, visuospatial capabilities and overall cognition (Table 1).

The effectiveness of EG interventions on physical functions was unclear (Bleakley et al., 2015; Molina et al., 2014; Rodrigues et al., 2014). Compared to fall prevention programs, single-task training, motor-motor dual-task training and active and inactive controls, two reviews found EG interventions superior (Neri et al., 2017; Taylor et al., 2018), and four were found equivalent (Choi et al., 2017; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Schoene et al., 2014) in improving physical functions. One review found higher benefits for single-task training compared to EGs in cognitively healthy older adults (Donath et al., 2016). Physical outcomes varied, including motor capacities (strength, gait, mobility, postural control and balance), and falls (rates, risk factors, fear) (Table 1).

No review assessed the effectiveness of EG interventions on dual-task functions.

It is worth noting that for all the functions studied, the effects of EG interventions were greater than for the inactive control group, and greater than or equal to the active control group.

3.2.4. Feasibility, safety, adherence, transfer and retention of EG interventions

EG interventions were mostly supervised (Donath et al., 2016; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018), or the use of supervision was unclear (Bleakley et al., 2015). Concerning safety, EG interventions induced no (Bleakley et al., 2015; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014) or rare adverse events (Taylor et al., 2018). The assessment of adherence to EG interventions encompassed several factors, such as appeal, enjoyment or completion. Thus, appeal and enjoyment (Bleakley et al., 2015; Molina et al., 2014; Taylor et al., 2018) were good. Completion and compliance were high (Bleakley et al., 2015; Laufer et al., 2014; Taylor et al., 2018; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019), while the drop-out rate was very low (Larsen et al., 2013). No reviews reported transfers or retention of benefits for EG interventions.

3.2.5. Methodological quality, risk of bias, quality of evidence and funding

The reviews included used different tools to assess the methodological quality of the primary studies included: the Cochrane collaboration risk of bias tool (Bleakley et al., 2015; Larsen et al., 2013; Neri et al., 2017; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018), the Physiotherapy Evidence Database scale (Donath et al., 2016; Joubert and Chainay, 2018; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Wang et al., 2015), the Jadad scale (Levin et al., 2017; Rodrigues et al., 2014), the Downs and Black scale (Plummer et al., 2015), the Portney and Watkins score (Agmon et al., 2014), and personal or modified scales (Schoene et al., 2014; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014; Zhu et al., 2016). The quality of the primary studies included was low to high (see details in Table 1).

Details of the AMSTAR-2 assessment of methodological quality are presented in Table 2. Two overview authors (MGG and AP) agreed at 87 % in their rating across the 18 systematic reviews included. The overall quality of the systematic reviews included was "Scritically low", with a 6/16 mean score.

Six reviews reported a source of funding (Choi et al., 2017; Larsen et al., 2013; Rodrigues et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Wang et al., 2015; Zhu et al., 2016), and all authors declared no conflicts of interests (Appendix D).

Table 2
Methodological quality of systematic reviews.

Systematic Review	AMSTAR-2 Criteria									
	Use PICO 1	Method 2[a]	Inclusion 3	Search strategy 4[a]	Selection x2 5	Extraction x2 6	Exclusions 7[a]	Description 8	RoB - RCT 9-1[a]	RoB - N-RCT 9-2[a]
Larsen, 2013	Y	P	N	N	Y	N	N	P	Y	n.a.
Laufer, 2014	Y	N	N	Y	Y	Y	N	P	P	n.a.
Rodrigues, 2014	Y	P	N	P	Y	Y	N	N	P	N
Agmon, 2014	N	P	N	P	Y	Y	N	Y	N	N
Wollesen, 2014	Y	P	Y	P	N	N	Y	Y	P	Y
Molina, 2014	Y	N	N	P	Y	N	N	P	P	n.a.
Schoene, 2014	Y	N	N	P	Y	N	N	N	P	Y
Plummer, 2015	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	P	Y	Y
Wang, 2015	Y	Y	N	P	Y	Y	N	N	P	n.a.
Bleakley, 2015	N	P	N	N	Y	Y	N	P	N	N
Donath, 2016	Y	P	N	P	Y	Y	N	P	P	n.a.
Zhu, 2016	Y	Y	N	P	Y	Y	N	P	P	P
Neri, 2017	Y	Y	N	P	Y	Y	N	Y	Y	n.a.
Choi, 2017	Y	N	N	P	Y	N	N	P	N	N
Levin, 2017	Y	P	N	N	Y	N	Y	N	P	N
Taylor, 2016	Y	P	N	N	Y	N	N	P	Y	n.a.
Joubert, 2018	Y	P	N	N	N	N	N	P	Y	Y
Stojan, 2019	Y	N	N	P	Y	Y	N	P	Y	n.a.
% of "No"	11	28	94	33	11	44	83	22	17	22

Systematic Review	AMSTAR-2 Criteria								Rating (/16)	
	Funding 10	MA:Method 11-1[a]	MA:Method 11-2[a]	MA:RoB 12	RoB discuted 13[a]	Heterogeneity 14	MA:RoB 15[a]	COI/funding 16		Overall confidence in the results of the review
Larsen, 2013	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	Y	n.a.	Y	5	Critically low
Laufer, 2014	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	N	n.a.	Y	5	Critically low
Rodrigues, 2014	N	Y	N	N	Y	Y	N	Y	7	Critically low
Agmon, 2014	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	N	n.a.	Y	4	Critically low
Wollesen, 2014	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	Y	n.a.	Y	7	Low
Molina, 2014	N	n.a.	n.a.	n.a.	Y	Y	n.a.	Y	5	Critically low
Schoene, 2014	N	n.a.	n.a.	n.a.	Y	Y	n.a.	Y	5	Critically low
Plummer, 2015	N	Y	n.a.	Y	N	Y	Y	Y	12	Low
Wang, 2015	N	Y	n.a.	N	N	Y	Y	N	9	Critically low
Bleakley, 2015	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	Y	n.a.	Y	4	Critically low
Donath, 2016	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	8	Critically low
Zhu, 2016	N	Y	N	N	N	N	Y	Y	8	Critically low
Neri, 2017	N	Y	n.a.	Y	Y	Y	N	Y	11	Critically low
Choi, 2017	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	N	n.a.	N	2	Critically low
Levin, 2017	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	N	n.a.	Y	8	Critically low
Taylor, 2016	N	Y	n.a.	N	N	Y	N	Y	6	Critically low
Joubert, 2018	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	Y	n.a.	Y	5	Critically low
Stojan, 2019	N	n.a.	n.a.	n.a.	N	Y	n.a.	Y	6	Critically low

(*continued on next page*)

Table 2 (*continued*)

Systematic Review	AMSTAR-2 Criteria									Rating (/16)	Overall confidence in the results of the review
	Funding 10	MA:Method 11-1[a]	MA:Method 11-2[a]	MA:RoB 12	RoB discuted 13[a]	Heterogeneity 14	MA:RoB 15[a]	COI/funding 16			
% of "No"	100	6	17	22	72	28	17	11		Mean score = 5,8	

Rating overall confidence in the results of the review.
High: no or one non-critical weakness. The systematic review provides an accurate and comprehensive summary of the results of the available studies that address the question of interest.
Moderate: more than one non-critical weakness*. The systematic review has more than one weakness but no criticaor without non-critical weaknesses. The review has a critical flaw and may not provide an accurate and comprehensive summary of the available studies that address the question of interest.
Critically low: more than one critical flaw with or without non-critical weaknesses. The review has more than one critical flaw and should not be relied on to provide an accurate and comprehensive summary of the available studies.
[a] AMSTAR 2 critical domains; Y: Yes; P: Partially yes; N: No; n.a.: not applicable.

4. Discussion

The present overview aimed to suhe present overview aimed to summarize the effects of CMDT and EG interventions on cognitive, physical and dual-task functions in healthy older adults, as well as the feasibility, safety, adherence, transfer and retention of benefits of these interventions. Overall, the eighteen reviews included in this overview highlighted positive effects of CMDT interventions on cognitive, physical and dual-task functions, and EGs on cognitive outcomes. However, this overview also highlighted controversial elements, such as the effects of EG interventions on physical functions. Lastly, the effects of EG interventions on dual-task outcomes, as well as safety, adherence, transfer and retention of benefits, remain understudied for both types of intervention.

4.1. Cognitive-motor dual-task (CMDT) interventions

Compared to single-task, fall prevention programs or no intervention, CMDT intervention effects were found: i) superior (Joubert and Chainay, 2018; Levin et al., 2017) or equivalent (Zhu et al., 2016) on cognitive function; ii) superior (Wang et al., 2015) or equivalent (Levin et al., 2017) on physical functions and iii) superior on dual-task functions (Agmon et al., 2014; Plummer et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014). CMDTs can be recommended to improve cognitive, physical and dual-task functions in cognitively healthy older adults. CMDT interventions were mostly distributed in groups (Agmon et al., 2014; Plummer et al., 2015; Zhu et al., 2016), which would be as effective as individual sessions (Agmon et al., 2014) and less time-consuming.

The transfer of benefits of CMDT interventions on tasks other than those trained for or daily living activities was varied, with positive (Joubert and Chainay, 2018), mixed (Agmon et al., 2014; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) or unclear results (Zhu et al., 2016). This may be due to the lack of measurement tools to assess early changes in daily living activities or functional tests (Bruderer-Hofstetter et al., 2018).

The long-term benefits of CMDT interventions is understudied, even though it looks promising. (Agmon et al., 2014; Joubert and Chainay, 2018; Zhu et al., 2016). Through these reviews, nine articles included a follow-up period and reported a good retention of benefits. This retention varied from two weeks (Agmon et al., 2014) to five years (Joubert and Chainay, 2018); even though it could be discussed whether a persistence of effect of two weeks is "long-term".

The need for supervision, safety, home-based feasibility and adherence to CMDT interventions were almost never reported in reviews, while we know from the literature that the major obstacle to exercise interventions in older adults is often weak participation and adherence (Nyman and Victor, 2012).

4.2. Exergame (EG) interventions

EG interventions were found effective on cognitive functions (Bleakley et al., 2015) and equivalent to single-task, fall prevention programs or no intervention (Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019).

Conversely, the effectiveness of EG interventions on physical functions in older adults is unclear (Bleakley et al., 2015; Molina et al., 2014; Rodrigues et al., 2014). Moreover, compared to single-task, fall prevention programs or no intervention, reviews found EG interventions superior (Neri et al., 2017; Taylor et al., 2018), equivalent (Choi et al., 2017; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Schoene et al., 2014) or less effective (Donath et al., 2016). Thus, EGs cannot be considered as an alternative intervention for improving physical functions in cognitively healthy older adults. This might be due to the lack of control of the difficulty or intensity of the physical task (Lauenroth et al., 2016; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014).

It seems that authors have so far assessed the impact of EG

interventions on physical functions more than on cognitive functions, with the induced cognitive task being considered as “secondary” (Larsen et al., 2013). This could be reconsidered in view of recent results showing an effect of EGs on cortical activity (Anders et al., 2018). When interventions were directly compared, however, EGs were found more effective than CMDTs on cognitive functions in healthy older adults (Bruderer-Hofstetter et al., 2018; Lord and Close, 2018).

The effects of EG interventions on dual-task functions have never been reported in reviews. It is surprising that interventions including dual-tasks did not systematically have dual-task functions as their outcome. This may be due to the lack of standardized functional assessments for cognitive-motor dual-tasks (Agmon et al., 2014; Plummer et al., 2015; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014).

EG interventions were mostly distributed individually (Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Taylor et al., 2018). This may be due to the experimental need for supervision and the game support used.

Most reviews reported supervised EG interventions (Donath et al., 2016; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Schoene et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018), and this does not provide sufficient information to establish whether EG interventions can be recommended for unsupervised home use (Howes et al., 2017). However, systematic reviews reported satisfactory effectiveness and feasibility for exercise-based games interventions in home settings for healthy (Miller et al., 2014) or neurologically impaired (Perrochon et al., 2019) older adults.

The safety (Bleakley et al., 2015; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Taylor et al., 2018) and adherence (Bleakley et al., 2015; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Taylor et al., 2018; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) during EG interventions were good when assessed, but only reported in a few studies in this reviews. This is promising, EG being considered even more enjoyable than traditional interventions (Choi et al., 2017).

The transfer and long-term effects of EGs were mostly not reported, whereas they are needed to propose the best possible interventions. It is worth noting that many authors highlighted the lack of long-term assessment (Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Molina et al., 2014; Plummer et al., 2015; Wang et al., 2015).

Lastly, an unclear parameter is the use of commercial or non-commercial games. Commercial videogames such as Nintendo Wii ® or Xbox Kinect ® have already been introduced as alternatives in rehabilitation (Bonnechère et al., 2016) and balance training (Pietrzak et al., 2001). Commercial videogames are relatively inexpensive when compared with custom-developed rehabilitation tools, but less adapted (Laufer et al., 2014). They are not developed to specifically improve clinical outcomes and present a lack of task-specificity and progressive overload (Schoene et al., 2014). It has been reported that some dropouts were due to task complexity (Bleakley et al., 2015).

4.3. Common to CMDT and EG interventions

The positive results for CMDT and EG interventions should be interpreted carefully, because all included reviews with low or critically low methodological quality (Table 2).

The purpose of this overview was not to assess the most prolific intervention conditions. However, "recommendations" emerge from the literature included. For the most effective interventions on cognitive outcomes, one should focus on general rather than specific dual-task training (Lipardo et al., 2017; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014), individual or group-based (Agmon et al., 2014; Bruderer-Hofstetter et al., 2018) with increasing difficulty (Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) of demanding tasks (Lauenroth et al., 2016), integrating feedback (Lauenroth et al., 2016; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) and step training (Lord and Close, 2018; Schoene et al., 2014). For the most effective interventions on physical outcomes, one should focus on general rather than specific dual-task training (Lipardo et al., 2017; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014), demanding tasks (Lauenroth et al., 2016; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) with increasing difficulty (Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) and variable rather than fixed priority tasks (Agmon et al., 2014; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) including step training (Lord and Close, 2018; Schoene et al., 2014). In order to maximize the transfer effect, one should focus on variable (Lussier et al., 2017; Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014) and simultaneous task training (Wollesen and Voelcker-Rehage, 2014), including functional exercises (Bruderer-Hofstetter et al., 2018). The optimal dose of the interventions (length, frequency and duration) could not be established because every intervention seemed effective despite the great variability in modalities and outcomes both within and between reviews. While the dose was not a moderator according to one review (Vázquez et al., 2018), other authors indicated an efficacy for short programs (i.e. 40 min per week) (Agmon et al., 2014) or superior to 150 min per week (Howes et al., 2017). Also, it seems that the interventions should not be too frequent (i.e. less than five times per week), so as not to cause fatigue (Zhu et al., 2016).

The reviews included suggest that plasma brain-delivered neurotrophic factor (BDNF) and structural brain plasticity variations induced by CMDT and EG interventions need to be explored (Levin et al., 2017; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019). Indeed, the effects of physical activity on neuroplasticity facilitation (i.e. increasing BDNF) are limited in time and return to baseline 10 − 60 min after the physical activity (Knaepen et al., 2010). This might explain why simultaneous CMDT interventions were found more effective than sequential interventions for cognitively healthy older adults (Tait et al., 2017), inducing synergistic cognitive effects (Fissler et al., 2013) and affecting neuroplasticity additively (Bamidis et al., 2014; Bherer, 2015).

4.4. Limits

The first limit of this overview is the low methodological quality and high risk of bias of the reviews included and the primary literature within these reviews. The evaluation tools for risk of bias and rates for the primary literature differed through the different studies included. The AMSTAR-2 we used showed an overall critically low confidence in the results of the reviews included, even though seven of them followed PRISMA or Cochrane Guidelines (Donath et al., 2016; Larsen et al., 2013; Laufer et al., 2014; Neri et al., 2017; Plummer et al., 2015; Stojan and Voelcker-Rehage, 2019; Zhu et al., 2016). A possible explanation is how the grid was read and interpreted. AMSTAR-2 integrates a new system with critical domains. For instance, the 7th item (“providing the list of excluded studies”) was reported as “No” in 83 % of the reviews included, dropping their assessment to at least "low" (see Table 2). We have realised a simulation of this evaluation without the 7th and the 13th items. The overall confidence in the results of the reviews would then be mostly "moderate" or "low".

In addition, the classification of reviews was sometime difficult. For example, the review from Schoene et al. indicates “cognitive-motor training” in the title, but actually deals with EGs; we therefore chose to classify it as EG interventions. On the other hand, the review from Joubert et al. contains a single study using EG. In order not to provide conclusions on the effectiveness of EGs using a review of which one study out of fifty-two used Wii for its intervention, we therefore chose to classify it among CMDT interventions.

Lastly, as the interventions were multicomponent, it is difficult to fully identify which of the cognitive or physical tasks were the “active ingredients”, or whether it was a combination that provided the effects (Booth et al., 2016). Furthermore, the clinical scales used only provided an overall assessment, and not information on specific aspects or underlying mechanisms (Choi et al., 2017). Moreover, one cannot reach the same intensity levels during a dual-task training as during separate tasks (single-task or sequential training) (Joubert and Chainay, 2018). It is even possible that older people prioritize physical over cognitive tasks, which might be explained by wanting to protect oneself from falls

(Schaefer and Schumacher, 2011). It thus seems important to propose interventions with suitable physical and cognitive loads, ensuring that neither task takes precedence over the other.

4.5. Futures studies

Since the effectiveness of CMDT interventions on cognitive, physical and dual-task functions, and EGs on cognitive functions in cognitively healthy older adults were demonstrated, it is necessary to focus on that which is unclear, specifically the effectiveness of EG interventions on physical and dual-task functions, as well as the transfer and retention of benefits and the feasibility of both interventions (i.e. the optimum dose, the need for supervision, the need for group or individual sessions, safety and adherence). Further research should also focus on the need for task prioritization (Kelly et al., 2013; Yogev-Seligmann et al., 2010) in order to counterbalance avoidance strategies (Schaefer and Schumacher, 2011). Moreover, further research should focus on comparing the use of patient-oriented EGs with the use of commercial games. Lastly, CMDTs and EGs seem to be promising interventions with cognitively-impaired older adults (Bruderer-Hofstetter et al., 2018; Gheysen et al., 2018), but it would be relevant to explore this. Similarly, other types of CMDTs should be studied, such as mind-body exercises (i.e. tai-chi, dance, martial arts) (Booth et al., 2016; Bruderer-Hofstetter et al., 2018; Gheysen et al., 2018).

5. Conclusion

This present overview found positive effects of CMDT interventions on cognitive, physical and dual-task functions, and positive effects of EG interventions on cognitive functions in cognitively healthy older adults. These results should be interpreted carefully, considering their critically low average methodological quality. Future research should focus on the effects of EG interventions on physical and dual-task functions. Home-based feasibility, adherence, optimal dose, retention and transfer of benefits of these interventions, and the possible need for custom made EGs, are also still to be determined. Further individual studies should follow recommendations and more rigorous methodological standards in order to improve the quality of the evidence and provide guidelines for the use of CMDT and EG interventions in older adults.

Funding

This research received a grant from city of Limoges and the Nouvelle Aquitaine region. The funding source had no involvement in the conduct of the research.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgement

The authors thank Bradford J. McFadyen for proofreading and correcting the English, as well as the City of Limoges for their support.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at doi:https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101135.

References

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. Clin. Interv. Aging 477. https://doi.org/10.2147/CIA.S54978.

Anders, P., Lehmann, T., Müller, H., Grønvik, K.B., Skjæret-Maroni, N., Baumeister, J., Vereijken, B., 2018. Exergames inherently contain cognitive elements as indicated by cortical processing. Front. Behav. Neurosci. 12. https://doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00102.

Anton, S.D., Woods, A.J., Ashizawa, T., Barb, D., Buford, T.W., Carter, C.S., Clark, D.J., Cohen, R.A., Corbett, D.B., Cruz-Almeida, Y., Dotson, V., Ebner, N., Efron, P.A., Fillingim, R.B., Foster, T.C., Gundermann, D.M., Joseph, A.-M., Karabetian, C., Leeuwenburgh, C., et al., 2015. Successful aging: advancing the science of physical independence in older adults. Ageing Res. Rev. 24, 304–327. https://doi.org/10.1016/j.arr.2015.09.005.

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. Neurosci. Biobehav. Rev. 44, 206–220. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.019.

Baranowski, T., Buday, R., Thompson, D.I., Baranowski, J., 2008. Playing for real: video games and stories for health-related behavior change. Am. J. Prev. Med. 34 (1), 74–82. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2007.09.027. e10.

Bherer, L., 2015. Cognitive plasticity in older adults: effects of cognitive training and physical exercise. Ann. N. Y. Acad. Sci. 1337, 1–6. https://doi.org/10.1111/nyas.12682.

Bleakley, C.M., Charles, D., Porter-Armstrong, A., McNeill, M.D.J., McDonough, S.M., McCormack, B., 2015. Gaming for health: a systematic review of the physical and cognitive effects of interactive computer games in older adults. J. Appl. Gerontol. 34 (3), NP166–NP189. https://doi.org/10.1177/0733464812470747.

Bonnechère, B., Jansen, B., Omelina, L., Van Sint Jan, S., 2016. The use of commercial video games in rehabilitation: a systematic review. Int. J. Rehabil. Res. 39 (4), 277–290. https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000190.

Booth, V., Hood, V., Kearney, F., 2016. Interventions incorporating physical and cognitive elements to reduce falls risk in cognitively impaired older adults: a systematic review. JBI Database System. Rev. Implement. Rep. 14 (5), 110–135. https://doi.org/10.11124/JBISRIR-2016-002499.

Bougioukas, K.I., Liakos, A., Tsapas, A., Ntzani, E., Haidich, A.-B., 2018. Preferred reporting items for overviews of systematic reviews including harms checklist: a pilot tool to be used for balanced reporting of benefits and harms. J. Clin. Epidemiol. 93, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2017.10.002.

Bruderer-Hofstetter, M., Rausch-Osthoff, A.-K., Meichtry, A., Münzer, T., Niedermann, K., 2018. Effective multicomponent interventions in comparison to active control and no interventions on physical capacity, cognitive function and instrumental activities of daily living in elderly people with and without mild impaired cognition – a systematic review and network meta-analysis. Ageing Res. Rev. 45, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.arr.2018.04.002.

Chandler, J., Higgins, J., Deeks, J., Davenport, C., Clarke, M., 2017. Chapter 1: introduction. Cochrane Handbook for Systematic Review of Intervention Version 5.2.0 (Cochrane).

Choi, S.D., Guo, L., Kang, D., Xiong, S., 2017. Exergame technology and interactive interventions for elderly fall prevention: a systematic literature review. Appl. Ergon. 65, 570–581. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.10.013.

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 Med. (Auckland, N.Z.) 46 (9), 1293–1309. https://doi.org/10.1007/s40279-016-0485-1.

Fissler, P., Küster, O., Schlee, W., Kolassa, I.-T., 2013. Novelty interventions to enhance broad cognitive abilities and prevent dementia. Progress in Brain Research Vol. 207. Elsevier, pp. 403–434. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00017-5.

Ghai, S., Ghai, I., Effenberg, A.O., 2017. Effects of dual tasks and dual-task training on postural stability: a systematic review and meta-analysis. Clin. Interv. Aging 12, 557–577. https://doi.org/10.2147/CIA.S125201.

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. Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act. 15 (1). https://doi.org/10.1186/s12966-018-0697-x.

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. Phys. Ther. 97 (12), 1122–1137. https://doi.org/10.1093/ptj/pzx088.

Joubert, C., Chainay, H., 2018. Aging brain: the effect of combined cognitive and physical training on cognition as compared to cognitive and physical training alone—a systematic review. Clin. Interv. Aging 13, 1267–1301. https://doi.org/10.2147/CIA.S165399.

Kappen, D.L., Mirza-Babaei, P., Nacke, L.E., 2019. Older adults' physical activity and exergames: a systematic review. Int. J. Hum. Interact. 35 (2), 140–167. https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1441253. Scopus.

Kelly, V.E., Eusterbrock, A.J., Shumway-Cook, A., 2013. Factors influencing dynamic prioritization during dual-task walking in healthy young adults. Gait Posture 37 (1), 131–134. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.05.031.

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 Med. 40 (9), 765–801. https://doi.org/10.2165/11534530-000000000-00000.

Larsen, L.H., Schou, L., Lund, H.H., Langberg, H., 2013. The physical effect of exergames in healthy elderly-a systematic review. Games Health J. 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 Geriatr. 16 (1). https://doi.org/10.1186/s12877-016-0315-1.
Laufer, Y., Dar, G., Kodesh, E., 2014. Does a Wii-based exercise program enhance balance control of independently functioning older adults? A systematic review. Clin. Interv. Aging 9, 1803–1813. https://doi.org/10.2147/CIA.S69673.
Levin, O., Netz, Y., Ziv, G., 2017. The beneficial effects of different types of exercise interventions on motor and cognitive functions in older age: a systematic review. Eur. Rev. Aging Phys. Act. 14 (1). https://doi.org/10.1186/s11556-017-0189-z.
Lipardo, D.S., Aseron, A.M.C., Kwan, M.M., Tsang, W.W., 2017. Effect of exercise and cognitive training on falls and fall-related factors in older adults with mild cognitive impairment: a systematic review. Arch. Phys. Med. Rehabil. 98 (10), 2079–2096. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.04.021.
Lord, S.R., Close, J.C.T., 2018. New horizons in falls prevention. Age Ageing 47 (4), 492–498. https://doi.org/10.1093/ageing/afy059.
Lussier, M., Bugaiska, A., Bherer, L., 2017. Specific transfer effects following variable priority dual-task training in older adults. Restor. Neurol. Neurosci. 35 (2), 237–250. https://doi.org/10.3233/RNN-150581.
Miller, K.J., Adair, B.S., Pearce, A.J., Said, C.M., Ozanne, E., Morris, M.M., 2014. Effectiveness and feasibility of virtual reality and gaming system use at home by older adults for enabling physical activity to improve health-related domains: a systematic review. Age Ageing 43 (2), 188–195. https://doi.org/10.1093/ageing/aft194.
Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., The PRISMA Group, 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med. 6 (7), e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097.
Molina, K.I., Ricci, N.A., de Moraes, S.A., Perracini, M.R., 2014. Virtual reality using games for improving physical functioning in older adults: a systematic review. J. Neuroeng. Rehabil. 11, 156. https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-156.
Montero-Odasso, M., Verghese, J., Beauchet, O., Hausdorff, J.M., 2012. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. J. Am. Geriatr. Soc. 60 (11), 2127–2136. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2012.04209.x.
Nelson, M., Rejeski, W., Blair, S., Duncan, P., Judge, J., King, A., Macera, C., 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), 1094–1105. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.185650.
Neri, S.G., Cardoso, J.R., Cruz, L., Lima, R.M., de Oliveira, R.J., Iversen, M.D., Carregaro, R.L., 2017. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. Clin. Rehabil. 31 (10), 1292–1304. https://doi.org/10.1177/0269215517694677.
Nyman, S.R., Victor, C.R., 2012. Older people's participation in and engagement with falls prevention interventions in community settings: an augment to the cochrane systematic review. Age Ageing 41 (1), 16–23. https://doi.org/10.1093/ageing/afr103.
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. Eur. J. Ageing 3 (4), 179–192. https://doi.org/10.1007/s10433-006-0035-z.
Perrochon, A., Borel, B., Istrate, D., Compagnat, M., Daviet, J.-C., 2019. Exercise-based games interventions at home in individuals with a neurological disease: a systematic review and meta-analysis. Ann. Phys. Rehabil. Med. https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.04.004. S1877065719300600.
Pieper, D., Antoine, S.-L., Mathes, T., Neugebauer, E.A.M., Eikermann, M., 2014. Systematic review finds overlapping reviews were not mentioned in every other overview. J. Clin. Epidemiol. 67 (4), 368–375. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.11.007.
Pietrzak, E., Cotea, C., Pullman, S., 2014. Using commercial video games for falls prevention in older adults: the way for the future? J. Geriatr. Phys. Ther. 37 (4), 166–177. https://doi.org/10.1519/JPT.0b013e3182abe76e. (2001).
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. https://doi.org/10.1159/000371577.
Pollock, Michelle, Fernandes, R.M., Becker, L.A., Featherstone, R., Hartling, L., 2016. What guidance is available for researchers conducting overviews of reviews of healthcare interventions? A scoping review and qualitative metasummary. Syst. Rev. 5 (1), 190. https://doi.org/10.1186/s13643-016-0367-5.
Pollock, M., Fernandes, R., Becker, L., Pieper, D., Hartling, L., 2018. Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. Chapter V: Overviews of Reviews (Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions). Cochrane.
Reis, E., Postolache, G., Teixeira, L., Arriaga, P., Lima, M.L., Postolache, O., 2019. Exergames for motor rehabilitation in older adults: an umbrella review. Phys. Ther. Rev. 1–16. https://doi.org/10.1080/10833196.2019.1639012.
Rodrigues, E., Valderramas, S., Rossetin, L., Gomes, A.R., 2014. Effects of video game training on the musculoskeletal function of older adults: a systematic review and meta-analysis. Top. Geriatr. Rehabil. 30 (4), 238–245. https://doi.org/10.1097/TGR.0000000000000040. Scopus.
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.
Schardt, C., Adams, M.B., Owens, T., Keitz, S., Fontelo, P., 2007. Utilization of the PICO framework to improve searching PubMed for clinical questions. BMC Med. Inform. Decis. Mak. 7, 16. https://doi.org/10.1186/1472-6947-7-16.
Schoene, D., Valenzuela, T., Lord, S.R., de Bruin, E.D., 2014. The effect of interactive cognitive-motor training in reducing fall risk in older people: a systematic review. BMC Geriatr. 14 (1). https://doi.org/10.1186/1471-2318-14-107.
Shea, B.J., Reeves, B.C., Wells, G., Thuku, M., Hamel, C., Moran, J., Moher, D., Tugwell, P., Welch, V., Kristjansson, E., Henry, D.A., 2017. AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. BMJ (Clin. Res. Ed.) 358, j4008. https://doi.org/10.1136/bmj.j4008.
Skjæret, N., Nawaz, A., Morat, T., Schoene, D., Helbostad, J.L., Vereijken, B., 2016. Exercise and rehabilitation delivered through exergames in older adults: an integrative review of technologies, safety and efficacy. Int. J. Med. Inform. 85 (1), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2015.10.008.
Stojan, R., Voelcker-Rehage, C., 2019. A systematic review on the cognitive benefits and neurophysiological correlates of exergaming in healthy older adults. J. Clin. Med. 8 (5). https://doi.org/10.3390/jcm8050734.
Tait, J.L., Duckham, R.L., Milte, C.M., Main, L.C., Daly, R.M., 2017. Influence of sequential vs. simultaneous dual-task exercise training on cognitive function in older adults. Front. Aging Neurosci. 9. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00368.
Taylor, L.M., Kerse, N., Frakking, T., Maddison, R., 2018. Active video games for improving physical performance measures in older people: a meta-analysis. J. Geriatr. Phys. Ther. 41 (2), 108–123. https://doi.org/10.1519/JPT.0000000000000078. (2001).
Vázquez, F.L., Otero, P., García-Casal, J.A., Blanco, V., Torres, Á.J., Arrojo, M., 2018. Efficacy of video game-based interventions for active aging. A systematic literature review and meta-analysis. PLoS One 13 (12), e0208192. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208192.
Wang, X., Pi, Y., Chen, P., Liu, Y., Wang, R., Chan, C., 2015. Cognitive motor interference for preventing falls in older adults: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. Age Ageing 44 (2), 205–212. https://doi.org/10.1093/ageing/afu175.
Wollesen, B., Voelcker-Rehage, C., 2014. Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults: a systematic review. Eur. Rev. Aging Phys. Act. 11 (1), 5–24. https://doi.org/10.1007/s11556-013-0122-z.
Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J.M., Giladi, N., 2008. The role of executive function and attention in gait. Mov. Disord. 23 (3), 329–342. https://doi.org/10.1002/mds.21720. quiz 472.
Yogev-Seligmann, G., Rotem-Galili, Y., Mirelman, A., Dickstein, R., Giladi, N., Hausdorff, J.M., 2010. How does explicit prioritization alter walking during dual-task performance? Effects of age and sex on gait speed and variability. Phys. Ther. 90 (2), 177–186. https://doi.org/10.2522/ptj.20090043.
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 Res. Rev. 31, 67–79. https://doi.org/10.1016/j.arr.2016.07.003.

Annexe 2. Intensité physique mesurée et ressentie lors d'un entraînement en ST, en DT, et via un exergame

Licence CC BY-NC-ND 3.0

JMIR Publications
The Leading eHealth Publisher

Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study

Matthieu Gallou-Guyot, Anaick Perrochon, Romain Marie, Maxence Bourgeois, Stephane Mandigout

Submitted to: JMIR Serious Games
on: January 03, 2022

Preprint
JMIR Publications

Disclaimer: © The authors. All rights reserved. This is a privileged document currently under peer-review/community review. Authors have provided JMIR Publications with an exclusive license to publish this preprint on it's website for review purposes only. While the final peer-reviewed paper may be licensed under a CC BY license on publication, at this stage authors and publisher expressively prohibit redistribution of this draft paper other than for review purposes.

Table of Contents

Original Manuscript..... 4

Preprint JMIR Publications

Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study

Matthieu Gallou-Guyot[1] PT; Anaick Perrochon[1] Dr; Romain Marie[2] PhD; Maxence Bourgeois[1] PT; Stephane Mandigout[1] PhD

[1]Laboratoire HAVAE, Université de Limoges Limoges FR
[2]3iL Limoges FR

Corresponding Author:
Matthieu Gallou-Guyot PT
Laboratoire HAVAE, Université de Limoges
123, avenue Albert Thomas
Limoges
FR

Abstract

The physical and cognitive loads during exergaming may differ from more conventional cognitive-motor dual-task trainings. The aim of this pilot transversal study was to compare exercise intensity during exergame, cognitive-motor dual-task and single-task training sessions. We recruited healthy young adults who carried out one session of each t type of training: exergaming, cognitive-motor dual-tasking and single-tasking. We used a custom-made exergame as support. The sessions lasted 30 minutes, were spaced at least 24 hours, and took place in random order for each group of 4 participants. We used heart rates to assess exercise intensity, and the modified Borg scale to assess their perception of intensity. Sixteen healthy young participants carried out all sessions. There was no difference between the different types of training in mean heart rates ($p = 0.3$), peak heart rates ($p = 0.5$) or Borg scale scores ($p = 0.4$). Our custom-made exergames measured and perceived physical load did not differ between cognitive-motor dual-task and single-task training. As a result, our exergame can be considered as intense as more traditional physical training. Future studies should be conducted in seniors with or without cognitive impairments and should incorporate an assessment of cognitive performance.

(JMIR Preprints 03/01/2022:36126)
DOI: https://doi.org/10.2196/preprints.36126

Preprint Settings

1) Would you like to publish your submitted manuscript as preprint?
✓ **Please make my preprint PDF available to anyone at any time (recommended).**
Please make my preprint PDF available only to logged-in users; I understand that my title and abstract will remain visible to all users.
Only make the preprint title and abstract visible.
No, I do not wish to publish my submitted manuscript as a preprint.
2) If accepted for publication in a JMIR journal, would you like the PDF to be visible to the public?
Yes, please make my accepted manuscript PDF available to anyone at any time (Recommended).
✓ **Yes, but please make my accepted manuscript PDF available only to logged-in users; I understand that the title and abstract will**
Yes, but only make the title and abstract visible (see Important note, above). I understand that if I later pay to participate in <a href="http

Original Manuscript

Preprint JMIR Publications

Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study

M. Gallou-Guyot[1*], A. Perrochon[1], R. Marie[2], M. Bourgeois[1], S. Mandigout[1].

[1] HAVAE, EA 6310, Université de Limoges, Limoges, France
[2] 3iL Ingénieurs, Limoges, France.
***Corresponding author:**
Matthieu Gallou-Guyot,
Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire Handicap, Activités Vieillissement, Autonomie, Environnement (HAVAE, EA 6310), Université de Limoges
123 avenue Albert Thomas, FR–87000 Limoges (France)
e-mail: matthieu.gallou.guyot@gmail.com

Running title: Intensity during dual-tasking and exergaming
Declarations of Interest: None
Word Count Abstract: 195
Word Count Manuscript: 2106
Tables: 3
Figures: 2
References: 44

Preprint JMIR Publications

Abstract

The physical and cognitive loads during exergaming may differ from more conventional cognitive-motor dual-task trainings. The aim of this pilot transversal study was to compare exercise intensity during exergame, cognitive-motor dual-task and single-task training sessions. We recruited healthy young adults who carried out one session of each t type of training: exergaming, cognitive-motor dual-tasking and single-tasking. We used a custom-made exergame as support. The sessions lasted 30 minutes, were spaced at least 24 hours, and took place in random order for each group of 4 participants. We used heart rates to assess exercise intensity, and the modified Borg scale to assess their perception of intensity. Sixteen healthy young participants carried out all sessions. There was no difference between the different types of training in mean heart rates (p = 0.3), peak heart rates (p = 0.5) or Borg scale scores (p = 0.4). Our custom-made exergames measured and perceived physical load did not differ between cognitive-motor dual-task and single-task training. As a result, our exergame can be considered as intense as more traditional physical training. Future studies should be conducted in seniors with or without cognitive impairments and should incorporate an assessment of cognitive performance.

Key words: Exergame; dual-task; exercise intensity; heart rates**.**

Preprint JMIR Publications

1. Introduction

Exergames, or “active video games”, are videogames played on a digital device, including a wide range of interfaces [1] that require physical activity when played [2]. Exergames are a singular form of cognitive-motor dual-task training (CMDT), which is known to be efficient for both cognitive and physical functions [3, 4]. In addition, exergames are considered fun and are enjoyed by most users, facilitating exercise in an attractive, motivating and interactive environment [5]. However, exergames must be sufficiently demanding to induce effects, with regard to cognitive and physical loads [2, 6]. Therefore, the efficiency of exergames depends to some extent on their intensity.

As a singular form of CMDT, exergames should not differ in terms of physical level of solicitation. The tasks players are asked to perform are similar, one of them being cognitive and the other physical, the difference residing in the support used. Previous studies showed that most exergames induce moderate [7–10] to intense [8, 9, 11] exercise intensity in healthy young adults. However, there seem to be large variations in intensity between different exergames, depending on hardware (mostly Kinect® or Wii®) or the game used [11, 12]. For example, exergames such as Wii bowling induce low intensity [8], while Kinect Boxing or ”Your Shape Fitness Evolved 2012” induce intense physical activity [9, 11]. This variability in exercise intensity between tailor-made exergames must be even greater.

Significant heterogeneity in exercise intensity during exergaming raises questions about the impact of the support used. Would exercise intensity be the same during similar physical training sessions presented in either single task (ST) or CMDT conditions, whether using a tailor-made exergame as a support or not? To our knowledge, no study has compared e exercise intensity during exergaming and ST, and only one study has compared exercise intensity during CMDT and ST training in healthy young adults [13], showing higher intensity under CMDT than ST conditions.

To date, we have been unable to conclusively determine the impact of the training support (i.e., direct comparison between exergaming and CMDT) or the impact of a concurrent cognitive task (i.e., direct comparison to ST condition, considered as the reference modality for physical training) on the level of physical solicitation in healthy young adults. The aim of this study was to 1) compare exercise intensity during exergame, CMDT and ST training sessions, and 2) compared perceived exercise intensity.

2. Methods

2.1. Participants

Healthy young students from the university of Limoges volunteered for this pilot transversal study. The inclusion criteria were young adults between 18 and 35 years old, fluent in French. The non-inclusion criteria were to have a contraindication to physical activity, or to have eaten or drunk during the previous 2 hours. The exclusion criteria were the appearance during training sessions of an injury, significant pain or heart rates superior to 90% of theoretical maximal heart rates [14]. The volunteers had received an information document detailing the protocol and the data collected, in accordance with the Declaration of Helsinki as revised in 2013.

2.2. Procedure

Participants were recruited during practical exercise courses. They carried out 3 types of training: exergame (EG), cognitive-motor dual-task (CMDT) and motor single task (ST). The training sessions were designed identically: physical exercises (ST), with concurrent cognitive task (CMDT),

using an exergame as support (EG). The sessions were performed in groups of four participants and the order of training was randomized for each group. The sessions lasted 30 minutes and were spaced at least 24 hours apart. Sessions were divided into eight 3-minute-long exercises (see **Table 1**), with 30 seconds of rest and instructions in between; actual physical activity was therefore carried out for approximately 24 minutes. An animator supervised the sessions by giving instructions and assisting the participants. We have illustrated the differences between EG, CMDT and ST training during stepping performance in **Figure 1**.

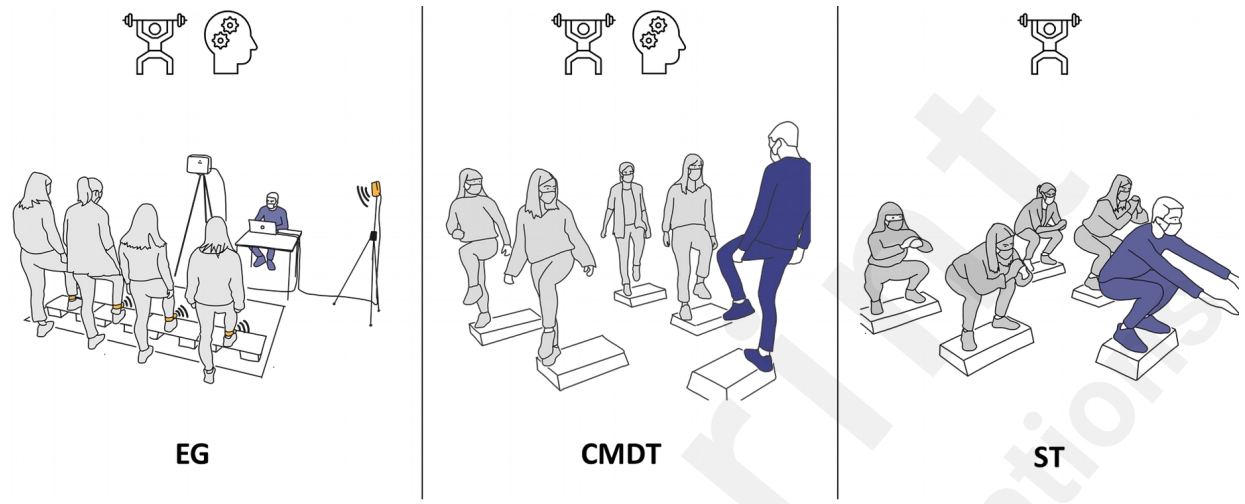


Figure 1: illustration of the differences between exergame (EG), cognitive-motor dual-task (CMDT) and single-task (ST) trainings, during the realization of a stepping task. The instructor is represented in blue.

During EG training, sessions consisted in multiple dual-tasks using a custom-designed exergame as support (**Figure 2**). This exergame was developed in the HAVAE laboratory, using the "Virtual Carpet", an association between video projector and HTC® Vive, as play area [15–17]. The projected scene was a schematic city, and players had during exercises to move to different points of interest. Detection by the Vive trackers of a player's position on a point of interest triggered a change of scene and launched a mini-game, carried out by all the players. The motor tasks were mainly stepper, muscle strength and balance activities. The cognitive tasks were verbal fluency, arithmetic, mental inhibition and flexibility, visuospatial memory, processing speed, and planning. Some exercises required gymnastic equipment (step, Swiss or medicine balls, chairs). The training sessions were designed to match with the American College of Sports Medicine (American College of Sports Medicine, 2014) and the World Health Organization [19] guidelines and recommendations on physical activity, as well as the recommendations to prevent falls in older adults [20]. Details on the exercises are indicated in **Table 1**.

During the CMDT training, the participants used the same gymnastic equipment, and the sessions were made up of the same associations of cognitive and motor dual-tasks as in the EG group, but without using the exergame (see exercise details in **Table 1**).

Finally, ST training required the same gymnastic equipment and the same motor tasks as those carried out during EG and CMDT training, but without a concurrent cognitive task (see exercise details in **Table 1**).

JMIR Preprints

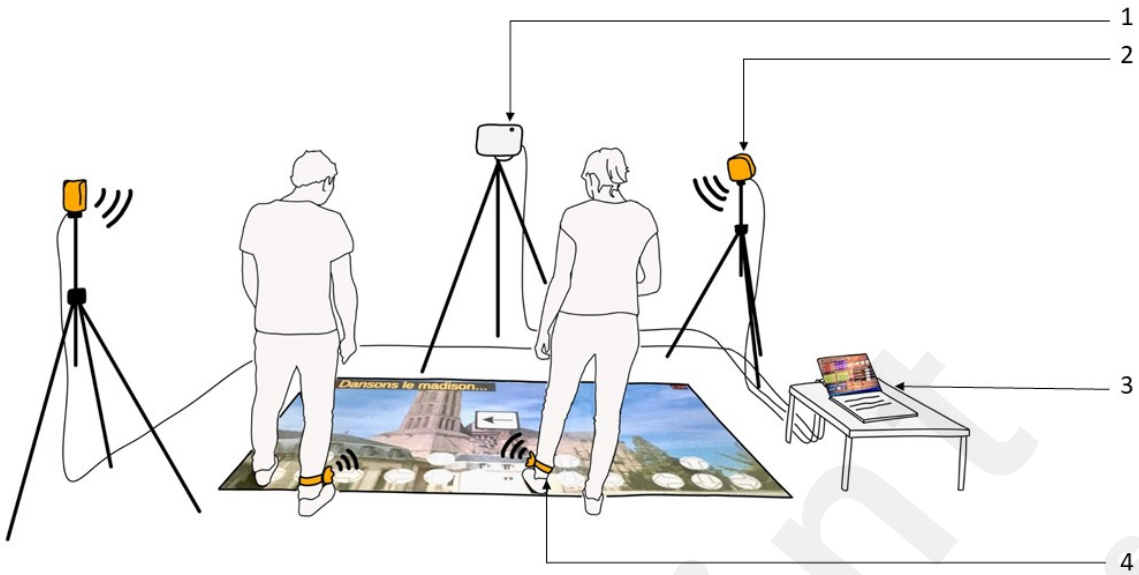


Figure 2: illustration of the exergame. 1) Video projector, 2) Vive infrared cameras, 3) Computer, 4) Vive trackers. In this example, only two participants are realizing a stepping exercise.

2.3. Outcomes

The primary outcome was the measured exercise intensity level assessed in terms of mean and peak heart rates (HR) during training. We used HR because it is considered the most practical parameter to monitor, especially as regards reliability, safety and cost [21]. We used validated chest HR Polar® H10 monitors (Polar Electro Oy, Kempele, Finland)[22]. We measured the participants' HR_{mean} and HR_{peak} during the three types of training.

The secondary outcome was the rating of perceived exertion using a validated modified Borg scale [23] completed by participants at the end of each training session.

2.4. Statistical analysis

Quantitative variables were described according to mean ± standard deviation or median and interquartile range. Normality of data distribution was assessed using Shapiro-Wilk tests. Comparison between HR_{mean}, HR_{peak}, and Borg scale scores during the different trainings (EG, CMDT and ST) were performed using a one-factor ANOVA or a Friedman test according to the normality of the variables concerned. Statistical analysis was performed using RStudio (Rstudio, Inc) and result significance was set at $p < 0.05$.

3. Results

Sixteen healthy young participants volunteered for the study (6 males, 10 females). Sociodemographic characteristics are presented in **Table 2**.

Characteristic	Mean ± Standard Deviation
Age (years)	24.6 ± 3.1
Height (m)	1.72 ± 0.11
Weight (kg)	69.1 ± 15.1

BMI	23.1 ± 3.2
$HR_{resting}$ (bpm)	66.9 ± 10.4
HR_{max} (bpm)	187.2 ± 1.2

Table 2: Participant characteristics. BMI: body mass index, HR: heart rate, bpm: beats per minute.

While mean and peak HR variable distribution was normal during the three types of training, the Borg scale scores were not. There was no difference between the different types of training (EG, CMDT and ST) for any of the variables studied: HR_{mean} ($F_{(2,45)} = 1.33$, $p = 0.27$), HR_{peak} ($F_{(2,45)} = 0.7$, $p = 0.50$), Borg scale scores ($\chi^2(2) = 1.85$, $p = 0.40$) (see details in **Table 3**).

	EG	**CMDT**	**ST**
Borg scale score (/10)	3.1 ± 1.4	3.6 ± 1.3	3.3 ± 1.0
HR_{mean} (bpm)	119.8 ± 12.2	123.8 ± 16.1	128.1 ± 14.7
% of theoretical HR_{max}	64	66	68
HR_{peak} (bpm)	157.9 ± 10.1	163.0 ± 12.8	161.7 ± 14.5

Table 3: Results depending on type of training. EG: exergame, CMDT: cognitive-motor dual-task, ST: single-task, HR: heart rate, bpm: beats per minute

Preprint JMIR Publications

4. Discussion

This pilot transversal study aimed at comparing measured and perceived exercise intensity during EG, CMDT and ST training sessions in healthy young adults. We observed no differences in mean or peak HR, or perceived exertion between the three types of training.

4.1. Perceived and measured physical activity intensity

In our study, physical activity intensities during EG, CMDT and ST training sessions did not statistically differ. This finding is discrepant with the results of a previous study, which showed higher HR_{mean} under CMDT than ST condition [13]. Our results even seemed opposed , with a tendency toward higher HR_{mean} during ST training of nearly 10 bpm, close to 70% of theoretical HR_{max} *and so moderate intensity* [24]. This difference with our study may be due to the nature of the requested tasks. Exercise intensity varies considerably according to type of movement, the body part involved (upper or lower limb), and also the level of difficulty of a given game (frequency and speed), and the participants' experience as players [25–27]. In the study by Herold et al., subjects were asked to carry out squats under both conditions, while additionally counting backward in CMDT [13]. In our study, the physical and cognitive tasks were not only more varied, but above all more complex (see **Table 1**). We tried to reduce this effect by proposing similar and transferable exercises between types of training. As a result, the exercises carried out in this study during training sessions were the same in EG, CMDT and ST, the differences consisting in the concurrent cognitive task and the use of a given game as support. In fact, instruction comprehension and error correction were time-consuming, decreasing effective exercise duration and HR over the course of the 30-minute sessions. Understanding of more complex combined tasks during CMDT, along with adaptation to new game rules and to a new environment during EG may have been more time-consuming than during ST.

Previous studies assessing the level of solicitation during exergaming in healthy young adults through HR have shown moderate [7–10] or intense [8, 9, 11] exercise intensity, with highly pronounced variability between studies according to the software or the hardware used. Our custom-made exergame seemed to induce moderate exercise intensity, equivalent to the same physical exercises requested under CMDT or ST conditions. This is a relevant and interesting finding: since exercises under ST conditions are considered as the reference modality for physical training, their equivalence during exergaming and dual-task training has enabled us to consider our exergame soliciting as sufficient to induce physical results, while adding a cognitive load in a playful environment.

Moreover, perceived physical intensity measured through the Borg scale did not differ between the three types of training and was globally moderate. Perception of effort by participants in this study was correlated with the results obtained from percentage of theoretical HR_{max} [24]. This is in line with previous studies showing that adults correctly estimate their less intense physical efforts [24, 28].

4.2. Limitations

The first limitation of this study is the small number of participants. However, our population was homogeneous and showed relative stability in physical intensity.

A second limitation is due to the modalities of exercise intensity assessment. In this study, due to its reliability, safety, and cost we used HR as a reflection of e exercise intensity.

But other studies used more direct parameters such as oxygen consumption [29, 30] or blood lactate responses [31] to assess exercise intensity during exergaming. Moreover, the software we used did not enable us to analyse HR in detail. It would be relevant to estimate the HR profile, rather it be stable and close to the mean, or on the contrary variable with peaks and rest.

4.3. Future studies

Most of the exergames of which the intensity was assessed in previous studies were commercial video games [7–9, 9–11]. This is more broadly true, especially insofar as commercial active video games are frequently used in rehabilitation [32]. The main consequence is a lack of control over qualitative and quantitative physical and cognitive exercises. The creation of tailor-made software using mainstream hardware is liable to suit the specific needs of a given audience [33], while applying an easily available and relatively inexpensive solution. For example, the training of the elderly presents specificities, both in form and in substance. Understanding is maximized thanks to slow animations, large fronts and simple rules [34]. With age, physical and cognitive capacities lower and cognitive-motor interference increases [35, 36]. Fall prevention in elderly persons should focus on strength, postural control, stepping and gait training [37–39], as well as mental inhibition and flexibility, processing speed and visuospatial memory [40–42]. In fact, a fall prevention training protocol with our exergame seems possible and relevant, insofar as facilitates simultaneous training of cognitive and physical functions. By applying our pilot study's values and methodology, future studies may assess the extent and the efficacy with which our exergame solicits elderly persons.

In this study, we investigated only physical aspects, not cognition. However, cognitive efficiency and HR may possibly be correlated: a meta-analysis found that participants with better cognitive task results often demonstrated greater cardiac parasympathetic control than those with poorer cognitive performance [43]. This question of interest could be investigated using hybrid systems, coupling functional near infrared spectroscopy (fNIRS) and electroencephalogram headsets [44].

5. Conclusion

This pilot transversal study showed that a custom-made exergame could induce moderate perceived and measured exercise intensity, equivalent to CMDT and ST training in healthy young adults. As a result, our exergame can be considered as being relevant as more traditional physical training considering exercise intensity. Future studies should investigate the cognitive and physical level of solicitation of our exergame in elderly persons, who are likely to benefit from CMDT.

Acknowledgements
The authors thank all the participants who volunteered, as well as the City of Limoges for their support. The authors also thank Dr Fanny Thomas for her contribution.

Authors' contributions
M. Gallou-Guyot: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – Original Draft, Vizualization ; **S. Mandigout** : Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Project Administration, Supervision; **R. Marie** : Development, Writing – Review & Editing ; **M. Bourgeois** : Investigation ; **A. Perrochon** : Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Project Administration.

Author Disclosure Statement (Conflict of Interest)
The authors report there are no competing interests to declare.

Funding
This research received a grant from city of Limoges and the Nouvelle Aquitaine region. The funding source had no involvement in the conduct of the research.

Preprint JMIR Publications

References

[1] Baranowski T, Buday R, Thompson DI, et al. Playing for Real: Video Games and Stories for Health-Related Behavior Change. *Am J Prev Med* 2008; 34: 74-82.e10.

[2] Vázquez FL, Otero P, García-Casal JA, et al. Efficacy of video game-based interventions for active aging. A systematic literature review and meta-analysis. *PLOS ONE* 2018; 13: e0208192.

[3] 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* 2020; 101135.

[4] Gallou-Guyot M, Mandigout S, Combourieu-Donnezan L, et al. Cognitive and physical impact of cognitive-motor dual-task training in cognitively impaired older adults: An overview. *Neurophysiol Clin* 2020; 50: 441–453.

[5] Skjæret N, Nawaz A, Morat T, et al. Exercise and rehabilitation delivered through exergames in older adults: An integrative review of technologies, safety and efficacy. *Int J Med Inf* 2016; 85: 1–16.

[6] Wollesen B, Voelcker-Rehage C. Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults: A systematic review. *Eur Rev Aging Phys Act* 2014; 11: 5–24.

[7] Haddock B L, Jarvis S, Klug N R, et al. Measurement of energy expenditure while playing exergames at a self-selected intensity. *Open Sports Sci J* 2012; 5: 1–6.

[8] Wu P-T, Wu W-L, Chu I-H. Energy Expenditure and Intensity in Healthy Young Adults during Exergaming. *Am J Health Behav* 2015; 39: 556–561.

[9] Polechoński J, Dębska M, Dębski PG. Exergaming Can Be a Health-Related Aerobic Physical Activity. *BioMed Res Int* 2019; 2019: 1890527.

[10] Rodrigues G, Felipe D, Silva E, et al. Acute cardiovascular responses while playing virtual games simulated by Nintendo Wii®. *J Phys Ther Sci* 2015; 27: 2849–2851.

[11] Sanders GJ, Peacock CA, Barkley JE, et al. Heart Rate and Liking During 'Kinect Boxing' Versus 'Wii Boxing': The Potential for Enjoyable Vigorous Physical Activity Videogames. *Games Health J* 2015; 4: 265–270.

[12] Mellecker RR, McManus AM. Active video games and physical activity recommendations: a comparison of the Gamercize Stepper, XBOX Kinect and XaviX J-Mat. *J Sci Med Sport* 2014; 17: 288–292.

[13] Herold F, Hamacher D, Törpel A, et al. Does squatting need attention?—A dual-task study on cognitive resources in resistance exercise. *PLOS ONE* 2020; 15: e0226431.

[14] Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, et al. Longitudinal Modeling of the Relationship between Age and Maximal Heart Rate. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 822–829.

[15] Perrochon A, Mandigout S, Petruzzellis S, et al. The influence of age in women in visuo-spatial memory in reaching and navigation tasks with and without landmarks.

Neurosci Lett 2018; 684: 13–17.

[16] Kronovsek T, Hermand E, Berthoz A, et al. Age-related decline in visuo-spatial working memory is reflected by dorsolateral prefrontal activation and cognitive capabilities. *Behav Brain Res* 2020; 112981.

[17] Gallou-Guyot M, Mandigout S, Lacroix J, et al. Biopsychosocial determinants of visuospatial memory performance according to different spaces. *Neurosci Res*. Epub ahead of print 6 August 2020. DOI: 10.1016/j.neures.2020.07.012.

[18] American College of Sports Medicine, Pescatello LS. *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2014.

[19] World Health Organization. *Global recommendations on physical activity for health. ...* Geneva: World Health Organization, 2010.

[20] Sherrington C, Michaleff ZA, Fairhall N, et al. Exercise to prevent falls in older adults: an updated systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 1750–1758.

[21] Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, et al. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43: 1334–1359.

[22] Plews DJ, Scott B, Altini M, et al. Comparison of Heart-Rate-Variability Recording With Smartphone Photoplethysmography, Polar H7 Chest Strap, and Electrocardiography. *Int J Sports Physiol Perform* 2017; 12: 1324–1328.

[23] Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 1982; 14: 377–381.

[24] Canning KL, Brown RE, Jamnik VK, et al. Individuals underestimate moderate and vigorous intensity physical activity. *PloS One* 2014; 9: e97927.

[25] O'Donovan C, Hussey J. Active video games as a form of exercise and the effect of gaming experience: a preliminary study in healthy young adults. *Physiotherapy* 2012; 98: 205–210.

[26] Butte NF, Watson KB, Ridley K, et al. A Youth Compendium of Physical Activities: Activity Codes and Metabolic Intensities. *Med Sci Sports Exerc* 2018; 50: 246–256.

[27] Mullins NM, Tessmer KA, McCarroll ML, et al. Physiological and Perceptual Responses to Nintendo® Wii Fit™ in Young and Older Adults. *Int J Exerc Sci* 2012; 5: 79–92.

[28] Braham R, Rosenberg M, Begley B. Can we teach moderate intensity activity? Adult perception of moderate intensity walking. *J Sci Med Sport* 2012; 15: 322–326.

[29] Wu P-T, Wu W-L, Chu I-H. Energy Expenditure and Intensity in Healthy Young Adults during Exergaming. *Am J Health Behav* 2015; 39: 556–561.

[30] Viana RB, Gentil P, Andrade MS, et al. Is the Energy Expenditure Provided by Exergames Valid? *Int J Sports Med* 2019; 40: 563–568.

[31] Çakir-Atabek H, Aygün C, Dokumacı B. Active Video Games Versus Traditional Exercises: Energy Expenditure and Blood Lactate Responses. *Res Q Exerc Sport* 2020; 91: 188–196.

[32] Bonnechère B, Jansen B, Omelina L, et al. The use of commercial video games in rehabilitation: a systematic review. *Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation* 2016; 39: 277–290.

[33] Laufer Y, Dar G, Kodesh E. Does a Wii-based exercise program enhance balance control of independently functioning older adults? A systematic review. *Clin Interv Aging* 2014; 9: 1803–1813.

[34] Chao Y-Y RN, GNP-BC, PhD, Scherer YK RN, EdD, Montgomery CA PhD, ANP-C, GNP. Effects of Using Nintendo Wii(TM) Exergames in Older Adults: A Review of the Literature. *J Aging Health* 2015; 27: 379.

[35] Montero-Odasso M, Verghese J, Beauchet O, et al. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. *J Am Geriatr Soc* 2012; 60: 2127–2136.

[36] Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. The role of executive function and attention in gait. *Mov Disord Off J Mov Disord Soc* 2008; 23: 329–342; quiz 472.

[37] Schoene D, Valenzuela T, Lord SR, et al. The effect of interactive cognitive-motor training in reducing fall risk in older people: a systematic review. *BMC Geriatr*; 14. Epub ahead of print December 2014. DOI: 10.1186/1471-2318-14-107.

[38] Nelson M, Rejeski W, Blair S, et al. Physical Activity and Public Health in Older Adults: Recommendation From the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation* 2007; 116: 1094–1105.

[39] Lord SR, Close JCT. New horizons in falls prevention. *Age Ageing* 2018; 47: 492–498.

[40] Segev-Jacubovski O, Herman T, Yogev-Seligmann G, et al. The interplay between gait, falls and cognition: Can cognitive therapy reduce fall risk? *Expert Rev Neurother* 2011; 11: 1057–1075.

[41] Lauenroth A, Ioannidis AE, Teichmann B. Influence of combined physical and cognitive training on cognition: a systematic review. *BMC Geriatr*; 16. Epub ahead of print December 2016. DOI: 10.1186/s12877-016-0315-1.

[42] 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*; 15. Epub ahead of print December 2018. DOI: 10.1186/s12966-018-0697-x.

[43] Thayer JF, Åhs F, Fredrikson M, et al. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neurosci Biobehav Rev* 2012; 36: 747–756.

[44] Shin J, von Lühmann A, Kim D-W, et al. Simultaneous acquisition of EEG and NIRS during cognitive tasks for an open access dataset. *Sci Data* 2018; 5: 180003.

Preprint JMIR Publications

Tables

EG	*Stepper (with and without a step)* Arrows are displayed successively on the projected scene, and participants must reproduce them on a pad with one foot, two feet, doing a squat, a lunge, etc. The additional cognitive tasks are to not reproduce an arrow (go/no go), to invert them (mental flexibility), or to render them with a delay (working memory).	*Visuospatial memory and balance* Eight elements displayed within the projected area will turn on and off at a fixed frequency, constituting a growing span. Participants must memorize this sequence and then recall it while moving around. At the same time, they perform motor exercises (knee raising, buttocks to heels, squats, lunges, jumping jacks). The additional cognitive tasks are to not consider one of the icons, or to recall the span from the end.	*Muscular strength and coordination* Participants must perform muscle strengthening exercises (i.e., squat and lunges). At the same time, they must: 1) solve mental arithmetic exercises appearing on the projected scene, 2) alternate the exercises performed according to the images appearing on the projected scene, and 3) perform a “categories” game or build a word giving a letter, each in turn.
CMDT	*Stepper (with and without a step)* The animator shows a sequence of movements that the participants must reproduce in mirror (step, squat, lunge, etc.). The additional cognitive tasks are to not reproduce an arrow (go/no go), to invert them (mental flexibility), or to render them with a delay (working memory).	*Visuospatial memory and balance* Participants must displace a total of 8 plots, each in turn. The plot placing order constitutes the span. Participants must memorize this sequence and then recall it while moving around. At the same time, they perform motor exercises (knee raising, buttocks to heels, squats, lunges, jumping jacks). The additional cognitive tasks are to not consider one of the icons, or to recall the span from the end.	*Muscular strength and coordination* Participants must perform muscle strengthening exercises (i.e., squat and lunges). At the same time, they must: 1) alternate the exercises performed according to the auditory or visual stimuli given by the animator, and 2) perform a “categories” game or build a word giving a letter, each in turn.
ST	*Stepper (with and without a step)* The animator shows a sequence of movements that the participants must reproduce in mirror (step, squat, lunge, etc.). There is no additional cognitive task.	*Balance* The animator demonstrates static and dynamic balance exercises to perform. The participants must perform movements of the limbs and trunk, pass a medicine ball, while standing on a Swiss ball or standing on one leg. There is no additional cognitive task.	*Muscular strength and coordination* Participants perform a game mixing together muscle strengthening of the lower limbs and motor coordination by dribbling with a ball. There is no additional cognitive task.

Preprint JMIR Publications

Table 1: Details of the exercises proposed during the different types of training. EG: exergame, CMDT: cognitive-motor dual-task, ST: single-tas

Preprint
JMIR Publications

Preprint
JMIR Publications

Annexe 3. Protocole d’étude du projet INCOME

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Exergame and cognitive-motor dual-task training in the healthy elderly (INCOME): a study protocol

Matthieu Gallou-Guyot, PT, MSc[1], Stéphane Mandigout, PhD, HDR[1], Patricia Shirley de Almedia Prado, PhD[1], Romain Marie, PhD[2], Jean-Christophe Daviet, MD, PhD[1,3] and Anaïck Perrochon, PhD, HDR[1]

[1]Laboratoire HAVAE, UR 20217, Université de Limoges, Limoges, France, [2]Institut d'Ingénierie Informatique de Limoges (3iL), Limoges, France, [3]Pole Neurosciences Tête et Cou, Service de Médecine Physique et de Réadaptation, Hopital Reberyol, CHU de Limoges, Limoges, France

DOI: 10.52057/erj.v2i1.8
received: 22 September 2021
accepted: 25 January 2022

ABSTRACT

Background: Ageing is associated with a decrease in cognitive, motor, and dual-task capacities, leading to a possible loss of autonomy. Cognitive-motor dual-task training is known to be effective on these functions but suffers from low adherence. On this point, exergames seem to be a promising solution. We aim to evaluate the effects of a new customized exergame on 1) postural stability under dual-task conditions 2) cognitive, motor and biopsychosocial factors in the elderly. **Methods**: Thirty-nine elderly persons (65 years old or above) will carry out 30 minutes of cognitive-motor dual-task training through our exergame, 2 to 3 times a week for 12 weeks. We will assess postural control under single and dual-task conditions (stabilometric platform), mental inhibition (Stroop test), mental flexibility (Trail Making Test), working memory (N-Back), mobility (Timed Up-and-Go), balance (Berg Balance Scale), fear of falling (Falls Efficacy Scale), quality of life (EuroQol), city exploration, and tracked (Armband®) or self-reported (QAPPA) physical activity level. Lastly, we will assess the safety (adverse events) and adhesion (compliance, drop-out, motivation) of this intervention. These evaluations will take place after the training protocol and after a 3-month follow-up. **Discussion**: This pilot study is expected to bring positive gains for the participants, as well as exploration of current knowledge gaps in the literature.

Trial registration: NCT04179708 (ClinicalTrials.gov)

KEYWORDS: cognitive-motor dual-task; exergame; study protocol; training; elderly

Background

Aging is associated with a high risk of developing physical or cognitive impairments, contributing to invalidity and loss of autonomy in older adults [1]. Among physical capacities that decrease with age, we can mention decreases in muscle strength, balance as well as mobility [2, 3], which are fall risk factors. Regarding cognitive capacities, decrease in executive functions, reaction time and processing speed likewise represent fall risk factors [4]. Aging is associated with a decreased ability to perform two tasks simultaneously (i.e., dual-task), one cognitive and one motor [5, 6]. The performance decrease in one or both tasks highlights cognitive-motor interference that can be explained by an overload of the attentional capacities. Most daily activities require the simultaneous performance of two tasks [7], and loss of this capacity can lead to loss of autonomy. Postural control under dual-task condition is impaired and is a predictor of falling in older adults [8, 9, 10, 11]. That is the reason why new strategies such as cognitive-motor dual-task (CMDT) intervention seem relevant to improve this function.

Abundant literature illustrates the positive effects of CMDT on cognitive, motor, and dual-task capacities in elderly persons with [12] or without [13] cognitive impairments. There are many types of interventions that induce cognitive-motor interference, such as exergames. Exergames are active video games that require physical activity in order to be played [14]. Systematic reviews studying the effectiveness of exergames

Corresponding author:
Matthieu Gallou-Guyot Laboratoire Handicap, Activités, Vieillissement, Autonomie, Environnements (HAVAE, EA 6310), Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges 123 avenue Albert Thomas, FR-87000, Limoges, France e-mail: matthieu.gallou.guyot@gmail.com

have presented mixed results, considering them to be effective on cognitive capacities [15], but not necessarily on motor capacities [16, 17]. A recent overview has highlighted the need to assess the impact of exergames on motor and dual task functions in elderly persons [13].

In general, one of the major obstacles is the possibly insufficient participation and motivation of elderly persons in training programs [18]. On the contrary, their adhesion to exergames seems good [19], and in any event superior to conventional interventions [20, 21]. Their success may be due to the continuous and instant feedback offered by exergames [22], as well as the fun aspect [23] which enhances participant adherence and compliance by increasing their pleasure and enjoyment [22, 23].
Most of the exergames used in rehabilitation are commercial videogames such as Nintendo® Wii or Xbox® Kinect [24]. However, many recommendations for the conception, design and use of games in health indicate that in order to be effective, they must be specific to patients' needs [25, 26]. Except for a few initiatives (i.g., SylverFit, MediMoov and Mira Rehab), there are presently few exergames specific to the elderly population. Recently, we have developed a new tool, the "Virtual Carpet", to assess visuospatial working memory [27, 28, 29]. This tool uses an interactive floor which can be adapted for a training program (**Figure 1**) [30]. The flexibility provided by this device makes it possible to design a game that meets the needs of seniors based on their city's heritage (buildings, gardens and living spaces). Based on the reminiscence theory of knowledge [31], reference to local cultural heritage should not only increase adherence and immersion in the game, but also encourage participants to leave their homes and rediscover these places.
Finally, while retention of benefits is an important criterion for interventional studies, this information is rarely reported for CMDT and exergames [32, 33, 34, 35, 36, 37], with mixed results ranging from zero to five years of retention of benefits. A recent overview highlighted the need to measure the adherence, safety and retention of benefits of CMDT and exergames among the elderly [13].

Figure 1 The exergame. 1) Video projector, 2) Projected scene 3) Computer. In this illustration, only two participants are present, the objective being to maximize visibility

Primary aim of the trial

The primary aim of this study is to compare postural control under dual-task conditions with a stabilometric platform before (T1) and after (T2) CMDT using a custom-made exergame as support in an elderly population.

Secondary aims of the trial

The secondary aims of this study are to assess the effects of this exergame after training (T2) and a follow-up (T3) period on the cognitive and motor capacities, physical activity level, city exploration, and quality of life of elderly participants. We also aim at assessing the safety and adherence levels of this exergame.

Methods

Study design and settings

The INCOME project (INterference COgnitivo-Motrice Exercise) is a 24-week prospective multicentric pilot study. The HAVAE laboratory from the Limoges University will conduct this study in Nouvelle-Aquitaine, France, and the Limoges University Hospital will be the promoter. The study protocol is in accordance with the Standard Protocol Items: Recommendations for Interventional Trials (SPIRIT) guidelines. Participants will perform CMDT through an exergame for 12 weeks, followed by 12 weeks without training (see detailed study flowchart in **Figure 2**.

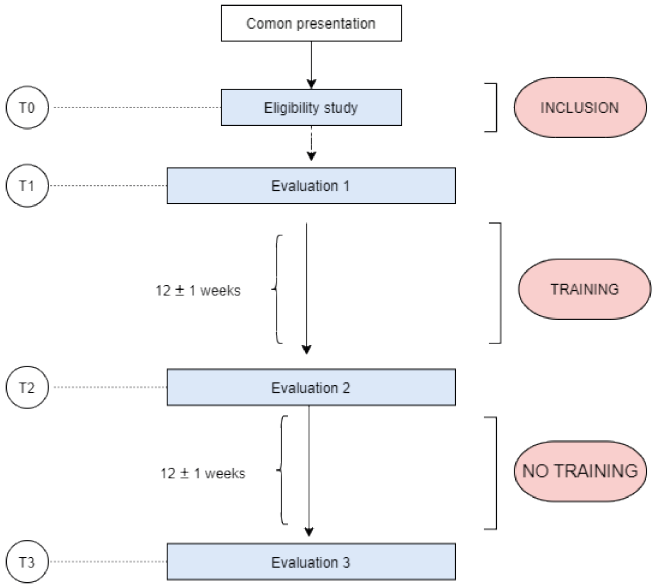


Figure 2 Study flowchart

Participants

Recruitment The principal investigator will recruit participants among elderly persons living in autonomous municipal residences (RAMs) or participating in senior clubs in the city of Limoges. The principal investigator will introduce the study to potential participants. Volunteers will be received individually for an eligibility study. If they meet the inclusion criteria and give their written consent (**see supplemental material**), they will be included and will then receive an information notice (**see supplemental material**). Participants will be excluded from the study if: a) they withdraw their consent to participate in this study during or after data collection, b) a serious adverse event occurs (deterioration of the participant's state of health, fall, injury, onset of disabling pain).

Eligibility To participate in this study, volunteers must: a) be over 65 years old, b) be a resident of a RAM or a member of a senior club in the city of Limoges, c) have normal or corrected vision and hearing, d) be able to walk and stand without assistance (a single cane as the maximum technical aid allowed). We will not include people who present diagnosed psychiatric disorders or neurological pathologies (cardiovascular accidents, Parkinson's or Alzheimer's disease, dementia), drug intake affecting walking or balance, a need for technical assistance (double cane, walker), inability to carry out the training program, as well as people under curatorship, guardianship or legal protection, not affiliated to social security, or unable to understand the protocol.

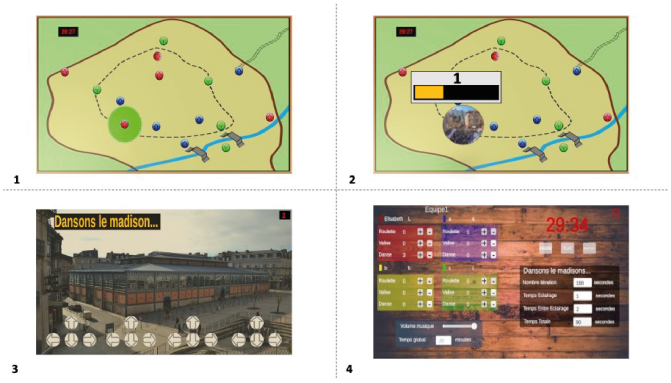


Figure 3 The different exergame interfaces displayed on the ground for players (3.1-3.3) or on the screen for the animator (3.4). The city of Limoges and its' 15 points of interest (3.1), Loading of a mini game (3.2), Mini-game interface (e.g., stepper) (3.3), Animator interface (3.4).

Sample size calculation The calculation is based on a previous study by Fraser et al., assessing postural control during a concurrent cognitive task [38]. We hypothesized that the program would improve center of pressure oscillation speed ($mm.s^{-1}$) when performing a Stroop test by 30%. We performed an estimation with .80 power and .05 α risk. The resulting required sample size was 32 subjects. We added 20% to ensure the statistical power of the study, taking into account drop-out. As a result, the total sample will consist in 39 participants.

Ethical approval and considerations

All procedures will follow the principles of the Good Clinical Practice Guidelines of the Declaration of Helsinki. This project received authorization from the ethics and individual protection committee (IPC) sud-est 2 (specific reference number: 2020-A02805-34). Any significant amendment to the protocol will have to be approved by the Committee prior to its implementation. This project is registered at ClinicalTrials.gov (NCT04803799). The consent form and the information notice will be drawn up in triplicate, one copy of which will be given to each participant. Results will be published in relevant scientific journals and be disseminated in international conferences.

Intervention

Exergame conceptualization We conceptualized our exergame based on recommendations from senior training [13]. The game consists in a projection of the city of Limoges onto the ground as a game board. The space needed for the game setting is 5 meters x 5 meters. This allows projection of the board game on the ground (3 meters x 4 meters) while keeping space for participant displacement and chair placement for any needed pause. The aim of the game is for players to explore the main places in the city, which hosts mini-games involving CMDT lasting an average of 3 minutes. The 30-minute sessions will take place in groups of 4 participants who will collectively try to obtain the highest possible score. The scores are assigned by the animator for each mini-game as follows: a player's presence counts as 1, his participation as 2, and his satisfactory achievement as 3 (see Figure 3.4). The sessions will take place 2 to 3 times a week for 12 weeks (2 sessions in even weeks, 3 in odd weeks); this training rate is based on published guidelines [39]. Since the groups are set in advance, the players will be able to see the progression curve of individual and collective scores over the course of the 12 weeks. To facilitate understanding of the game, we use slow animations, large fonts, and simple menus and rules [40].

Interfaces The mini-games sequences proceed as follows: each player is associated with a color (red, yellow, green, or blue) represented by his

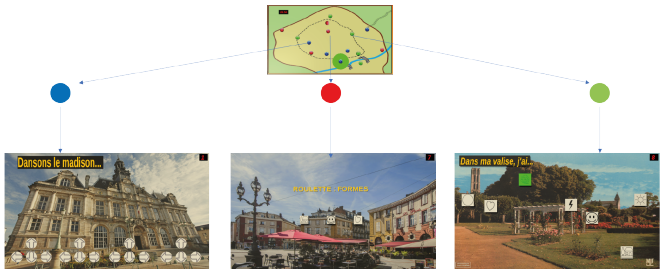


Figure 4 Three points of interest and exercises types. The schematic view of the city contains 15 points of interest, grouped into three categories: five buildings in blue, five events in red and five parks in green. These points of interest also represent exercises types: *The buildings* represent a stepping activity. Arrows are displayed successively on the projected image, and participants must reproduce them on a pad with one foot, two feet, a squat, a lunge, etc. The additional cognitive tasks are to not reproduce an arrow (i.e. go/no go), to invert them (mental flexibility), or to perform them with a delay (working memory).*The events* represent muscle strength and coordination. Participants must perform muscle strengthening exercises (e.g. squats and lunges). At the same time, they must solve mental arithmetic exercises appearing on the projected image, alternate the exercises performed according to the images appearing, perform a "categories" game or build a word giving a letter at each turn. *The parks* represent visuospatial memory and balance. Eight elements displayed within the projected area turn on and off at a fixed frequency, constituting a growing span. Participants must memorize this sequence and then recall it while moving around. At the same time, they perform motor exercises (knee raising, buttocks-heels, squats, lunges, jumping jacks). The additional cognitive tasks are to not consider one of the icons, or to recall all from the end.

HTC® Vive tracker. The projected city of Limoges includes 15 points of interest (parks, buildings, or events). At each step, a single point of interest is randomly selected, and circled with one of the four colors (**Figure 3.1**). It is then up to the player with the corresponding color to step on the circled point of interest for 3 seconds (materialized by a visible countdown). The scene then changes to the corresponding mini-game interface (**Figures 3.2 and 3.3**). Once the 3-minute mini-game has been completed, the game board goes back to the projected city of Limoges (**Figure 3.1**), where a new point of interest is selected (with a color corresponding to a different player). It bears mentioning that successively, each player will have an active role in launching the mini-games, using a random selection from an updated list of previously unsolicited players (at each step, the selected player is removed from the list). When the list is empty, it is simply refilled with each participant, thereby maintaining awareness, even between mini-games.

The scene changes are triggered using the collision between the estimated position of the players (given by the HTC® Vive trackers in the real world) and their collision with the known position of the points of interest (in the application). To detect such collisions and given that both positions are expressed in different coordinate systems, a projection of the player's position in the game frame must be performed (in real time). In other words, given a point $\mathbf{p} = (x_w, y_w)$ expressed in the world coordinate system, it is required to estimate its position $\mathbf{q} = (x_g, y_g)$ in the game scene. This is given by $\mathbf{q} = \mathbf{Hp}$, where H is the homography matrix between the world scene and the game scene, obtained by calibration when the game is installed - a specific tool was designed for this purpose. Given that the position of each player is estimated by the HTC® Vive trackers with accuracy [41] but with some noises, a low pass filter is applied to improve player experience.

Finally, a second view projected on an independent screen is specifically

dedicated to the animator (**Figure 3.4**). It acts as a control panel, and enables the functioning of essential supervision tools, such as mini-game pause or reset, difficulty settings (i.e. how often or how quickly items are displayed), and point management.

Training program The training program is made up of dual-task exercises, which are proposed during 3 mini-games (**Figure 4**). These mini-games are represented by 3 different point of interest categories: parks, buildings, or events. "Parks" bring together visuospatial memory and gait, "buildings" the stepping exercise, and "events" muscular strength and coordination training. The requested motor tasks are stepping, postural control and resistance training which are conventional in fall prevention programs for seniors [42, 43, 44]. The postural control exercises consist of working on ground supports, uni or bipodal balance, displacement of the center of pressure, with or without intrinsic and extrinsic destabilization. The strengthening exercises target the lower limbs and the trunk, in endurance and functional, with or without equipment (weights, rubber bands). Cognitive tasks include verbal fluency, mental inhibition, flexibility, visuospatial memory and processing speed training [4, 39, 45]. To illustrate, one of the exercises consisted in performing lunges while walking on the projected scene, the objective being to recreate the presented path in the city while counting backward or giving the name of a city on each point of interest. These cognitive and motor dual-task exercises are based on the recommendations found in the literature: increasing difficulty in speed, number of repetitions, or use of gymnastic equipment (weights, rubber bands, etc.) [33], complex tasks [14, 33] carried out simultaneously [46], with variable priority instruction [32, 33], and feedback at the end of each training session [33, 39]. Frequency ranges from 15 to 30 movements per minute. The speed and the number of repetitions depend directly on frequency, because each exercise time is set in advance (3 minutes on average). We preliminary designed an incremental program. The milestone underlying the decision to increase the overall difficulty is the success of each participant at a certain level during one week. Our exergame and the different exercises it offers have already been presented in a pre-study in young and healthy subjects [47].

Outcomes and Evaluations

The approximate duration of the assessment is 2 hours. Assessment of the participants' physical activity level takes place over 1 week. See **Table 1** for the details of evaluations performed at T1, T2 and T3.

Primary outcome The primary outcome of the study will be an analysis between T1 and T2 of the center of pressure speed oscillation ($mm.s^{-1}$) on a stabilometric platform (Win-Posturo, Médicapteurs®) during the performance of a concurrent Stroop test. Postural control in dual-task condition is widely used in studies involving elderly persons [38, 48, 49, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. During the evaluation, the participant is standing still on the platform, arms along the body. The participant is instructed to actively control his posture, standing as still as possible, and to perform a Stroop test during the 30-second evaluation. The Stroop test is presented on a poster (2m x 1m) pinned on the wall, 1.5 meters away from the platform.

Secondary outcome Measured at different times (T1, T2 or T3, see Table 1), the secondary outcomes are as follows:

1. Cognitive capacities: we will assess the dominant executive functions
   (a) **Mental inhibition**: During the Stroop test [56], the participant must distinguish the name of the written color from the color of the ink used. Scoring includes the time to complete the test (s), and the number of corrected and uncorrected errors
   (b) **Mental flexibility**: During the Trail Making Test (TMT) [57], the participant must link a consecutive sequence of 25 targets in ascending order; initially numbers (1,2,3, etc.), then letters (A, B, C, etc.), and finally the alternation between the two (1, A, 2, B, 3, C, etc.). Scoring includes the time to complete the test(s) as well as the number of errors.
   (c) **Working memory**: During the visual N-Back test [58], a continuous sequence of letters is presented to the participant. The task is to continuously indicate the letter previously displayed. The score corresponds to the number of errors.
2. Motor capacities: We will assess motor functions with a a major component concerning the risk of falling.
   (a) **Mobility**: During the Timed Up-and-Go test (TUG) [59], the subject will have to rise from his chair, walk 10 feet, turn around a mark, return to the chair, and sit down. The rating corresponds to the time taken to complete the test (s).
   (b) **Balance**: During the Berg Balance Scale (BBS) test [60], the subject is required to complete 14 simple balance tasks, ranging from getting up from a chair to standing on one leg. Scoring is done on a scale of 0 to 56 corresponding to the 14 items. Association between TUG sensitivity and BBS specificity is recommended in evaluation of the elderly [61].
   (c) **Fear of falling**: The Falls Efficacy Scale International (FES-I) [62] explores the participant's concern about the possibility of falling while performing activities. Scoring is done on a scale of 16 to 64 corresponding to the 16 items.
   (d) **Postural control in a single task condition**: Evaluation is made by studying the center of pressure oscillation speed ($mm.s^{-1}$) on a stabilometric platform (WIN-POSTURO, Médicapteurs®). During the evaluation, the participant is standing still on the platform, arms along the body. The participant is instructed to actively control his posture to stand as still as possible during the 30-second evaluation.
3. Physical activity level, assessed with:
   (a) A French questionnaire, the « Questionnaire d'activité physique pour les personnes âgées » (QAPPA) [63], assessing average weekly physical activity level (MET/min/week).
   (b) Wearing an Armband® (Sensewear Bodymedia) : mobile sensor worn on the arm during 7 days, assessing active energy expenditure (MET) and the number of steps [64].
4. City exploration: We will carry out an analysis of the city exploration made by the participants during the 12 weeks of training and the 12-week follow-up by means of a quantitative and qualitative survey concerning participants' departures from their residence or domicile. Participants must complete a weekly diary, indicating the number of times they leave their residence as well as the frequency of visits to the points of interest highlighted in the game (buildings, gardens, etc.).
5. Quality of life: We will carry out an analysis of the participants' quality of life by using the EuroQol 5 dimensions 5 levels (EQ-5D-5L) [65].
6. Safety: We will carry out a qualitative and quantitative analysis of the adverse events having occurred during the intervention (number, nature, severity and causes).
7. Adherence, including:
   (a) **compliance**, i.e. the number of sessions actually performed compared to the total number of sessions,

Table 1 Summary of participants' monitoring.

	INCLUSION	EVALUATION 1[a]	TRAINING	EVALUATION 2[a]	FOLLOW-UP	EVALUATION 3[a]
	T0	T1	T1 + 12 weeks	T2	T2 + 12 weeks	T3
		T0 + 1 week	*(+/− 1 week)*		*(+/− 1 week)*	
Information and consent	X					
Eligibility	X	X				
Sociodemographic		X				
PC DT		X		X		X
Stroop		X		X		X
TMT		X		X		X
N-Back		X		X		X
TUG		X		X		X
BBS		X		X		X
FES-I		X		X		X
PC ST		X		X		X
Security			X			
Compliance			X			
Drop-out			X			
EMAPS		X		X		X
Armband®[1]		X		X		X
QAPPA		X		X		X
City exploration			X			
EQ-5D-5L		X		X		X

[1] Armband® worn for 7 days ; [a] : evaluations carried out over 2 weeks. BBS : Berg balance scale ; DT dual task ; EMAPS: échelle de motivation pour l'activité physique à des fins de santé; EQ-5D-5L : EuroQol 5 dimensions 5 levels ; FES-I: falls efficiency scale international; PC : postural control ; QAPPA: questionnaire d'activité physique des personnes âgées ; ST: single task; TMT : trail making test ; TUG : timed up and go.

(b) **drop-outs**, i.e. the number of participants not going on until the end of the program,

(c) **motivation**, assessed through a French scale, the « Echelle de Motivation pour l'Activité Physique à des fins de Santé » (EMAPS) [66].

Data, constraints, and monitoring

Data collection and management A case report form will be used to collect personal and clinical data, and any missing data will have to be justified. The investigator will then have to transcribe this anonymized data on the secure servers of the Limoges CHU. Construction and securing of these databases is the CHU's responsibility, has been validated by the CNIL, and may be audited by the promoter or the ANSM. Storage will be maintained for 15 years after the end of the study.

Statistical analysis We will describe quantitative variables as mean ± standard deviation, or median and interquartile, and qualitative variables as numbers, percentages and 95% confidence intervals. We will compare dual-task postural control before and after training (between T1 and T2) using either the paired Student's t test or the non-parametric Mann-Whitney test, depending on whether the data follow a normal distribution. The effect of time on the training program will be evaluated using a repeated measures ANOVA or Friedman test, depending on whether the data follow a normal distribution. All participants will be included in the analysis (intention-to-treat analysis). A per-protocol analysis based on available (non-missing) data will also be carried out. The analysis will be performed using SPSS V.23.0.0.3 (IBM® SPSS Statistics).

Data monitoring and auditing The INCOME intervention protocol does not present a major risk for participants. As a result, we will not establish an independent data monitoring committee (IDMC). A clinical research technician will conduct data monitoring and auditing. The auditing will ensure research quality, result validity and compliance with French laws and regulations.

Constraints and compensation The main constraint in this study is the requirement of continuous training; participants will be allowed to enter another research project only once their participation in this study has ended, that is to say, after evaluation 3 has been completed. Participation in this study does not involve any compensation. Members of senior clubs who wish to participate will be compensated for their travel on a flat-rate basis of €100 or in proportion to the sessions carried out in the event of the participant leaving the study prematurely.

Discussion

The aim of this study is to evaluate the effects of a CMDT training program carried out through a custom-made exergame on dual-task, cognitive and physical capacities, physical activity level, city exploration, and quality of life of elderly participants, as well as safety and adherence to the exergame. This study is expected to bring positive gains for the participants as well as exploration of current knowledge gaps in the literature.

Based on the results of previous studies, which have shown an effect of exergames on cognitive [15, 42, 67] and motor [16, 20, 42, 68], functions in elderly persons, we expect to observe in participants an improvement in executive functions, as well as mobility and postural control. There are few studies evaluating the impact of exergames on dual-task abilities, and they have been without conclusive results [69, 70]. We can expect positive results among the elderly participants, exergames being a certain type of CMDT, which have been shown to be effective [13]. We can also expect satisfactory overall adherence [20, 21] and safety [12, 13]. Another positive impact of this trial is to increase the participants' levels of physical activity, either directly by training, or indirectly by highlighting their cultural heritage and encouraging them to explore their city. Improvement in participants' cognitive and motor functions and an increase in their level of physical activity should result in a reduction in risk factors for falls, maintenance of autonomy, and improved quality of life [7, 8, 9, 10, 11]. A fourth and final possible result of this study is inherent to the sustainability of the developed solution. The exergame will be left available to RAMs at the end of the study, and development of new mini-games will be possible in the future. The long-term availability of home training support is a crucial point in the context of the current global COVID-19 pandemic, which has rendered access to material and human rehabilitation resources particularly complex.

The main limitation of this study is the low level of evidence inherent to uncontrolled trials. However, this pilot study will serve as a basis for calculation of the sample size for a future randomized controlled clinical trial, comparing the level of effectiveness of the exergame on cognitive and motor capacities with a "traditional" CMDT training scheme known to be effective [12, 13].

Trial status The trial is currently in the recruitment phase. We have enrolled 27 out of the targeted 39 participants in the study and collected their initial data (T1).

Disclosure of interest

The authors declare they have no conflicting interests with the content of the article.

Ethics

This project received authorization from the ethics and individual protection committee (IPC) sud-est 2 (reference number: 2020-A02805-34).

Data availability

This project is registered and available at ClinicalTrials.gov (NCT04803799)

Authors' contribution

Manuscript: M. Gallou-Guyot: Conceptualization, Methodology, Writing - original, Illustrations; S. Mandigout: Conceptualization, Methodology, Writing - corrections, Project management; P.S. Almeida Prado: Writing – corrections; R. Marie: Writing - corrections; A. Perrochon: Conceptualization, Methodology, Writing - original, Illustrations, Supervision

Protocol: M. Gallou-Guyot: Animation, Assessment, Evaluation, Coordination; S. Mandigout: Coordination; P.S. Almeida Prado: Animation, Evaluation; R. Marie: Software development; J.-C. Daviet: Coordination; A. Perrochon: Coordination

Acknowledgements

The authors thank the Limoges RAM residents and the senior club adherents for their participation. The authors thank the city hall, the RAM directors and animators and Dr Fanny Thomas for their help.

Fundings

The INCOME project received financial support from the Limoges municipality and the Nouvelle Aquitaine region, both of whom will not be involved in the analyses.

References

[1] Stephen D. Anton, Adam J. Woods, Tetso Ashizawa, Diana Barb, Thomas W. Buford, Christy S. Carter, David J. Clark, Ronald A. Cohen, Duane B. Corbett, Yenisel Cruz-Almeida, Vonetta Dotson, Natalie Ebner, Philip A. Efron, Roger B. Fillingim, Thomas C. Foster, David M. Gundermann, Anna-Maria Joseph, Christy Karabetian, Christiaan Leeuwenburgh, Todd M. Manini, Michael Marsiske, Robert T. Mankowski, Heather L. Mutchie, Michael G. Perri, Sanjay Ranka, Parisa Rashidi, Bhanuprasad Sandesara, Philip J. Scarpace, Kimberly T. Sibille, Laurence M. Solberg, Shinichi Someya, Connie Uphold, Stephanie Wohlgemuth, Samuel Shangwu Wu, and Marco Pahor. Successful aging: Advancing the science of physical independence in older adults. *Ageing Research Reviews*, 24:304–327, November 2015. ISSN 1568-1637. doi: 10.1016/j.arr.2015.09.005. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568163715300258.

[2] Tareef Al-Aama. Falls in the elderly: spectrum and prevention. *Canadian Family Physician Medecin De Famille Canadien*, 57(7):771–776, July 2011. ISSN 1715-5258.

[3] Silvia Deandrea, Ersilia Lucenteforte, Francesca Bravi, Roberto Foschi, Carlo La Vecchia, and Eva Negri. Risk Factors for Falls in Community-dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-analysis. *Epidemiology*, 21(5):658–668, September 2010. ISSN 1044-3983. doi: 10.1097/EDE.0b013e3181e89905. URL https://insights.ovid.com/crossref?an=00001648-201009000-00020.

[4] O. Segev-Jacubovski, T. Herman, G. Yogev-Seligmann, A. Mirelman, N. Giladi, and J.M. Hausdorff. The interplay between gait, falls and cognition: Can cognitive therapy reduce fall risk? *Expert Review of Neurotherapeutics*, 11(7):1057–1075, 2011. doi: 10.1586/ern.11.69. URL https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79959961337&doi=10.1586%2fern.11.69&partnerID=40&md5=cdf9dd7d253af882a2c13bdf479c15b9.

[5] Manuel Montero-Odasso, Joe Verghese, Olivier Beauchet, and Jeffrey M. Hausdorff. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. *Journal of the American Geriatrics Society*, 60(11):2127–2136, November 2012. ISSN 1532-5415. doi: 10.1111/j.1532-5415.2012.04209.x.

[6] Galit Yogev-Seligmann, Jeffrey M. Hausdorff, and Nir Giladi. The role of executive function and attention in gait. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 23(3):329–342; quiz 472, February 2008. ISSN 1531-8257. doi: 10.1002/mds.21720.

[7] Andrea Trombetti, Mélany Hars, François R. Herrmann, Reto W. Kressig, Serge Ferrari, and René Rizzoli. Effect of Music-Based Multitask Training on Gait, Balance, and Fall Risk in Elderly People: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Internal Medicine*, 171 (6), March 2011. ISSN 0003-9926. doi: 10.1001/archinternmed.2010.446. URL http://archinte.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/archinternmed.2010.446.

[8] Lillemor Lundin-Olsson, Lars Nyberg, and Yngve Gustafson. "Stops walking when talking" as a predictor of falls in elderly people. *The Lancet*, 349(9052):617, March 1997. ISSN 0140-6736, 1474-547X. doi: 10.1016/S0140-6736(97)24009-2. URL https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(97)24009-2/fulltext. Publisher: Elsevier.

[9] A. Zijlstra, T. Ufkes, D. A. Skelton, L. Lundin-Olsson, and W. Zijlstra. Do dual tasks have an added value over single tasks for balance assessment in fall prevention programs? A mini-review. *Gerontology*, 54(1):40–49, 2008. ISSN 1423-0003. doi: 10.1159/000117808.

[10] Olivier Beauchet, Véronique Dubost, Gilles Allali, Régis Gonthier, François R. Hermann, and Reto W. Kressig. 'Faster counting while walking' as a predictor of falls in older adults. *Age and Ageing*, 36(4): 418–423, July 2007. ISSN 0002-0729. doi: 10.1093/ageing/afm011. URL https://academic.oup.com/ageing/article/36/4/418/40091.

[11] Joe Verghese, Gail Kuslansky, Roee Holtzer, Mindy Katz, Xiaonan Xue, Herman Buschke, and Marco Pahor. Walking While Talking: Effect of Task Prioritization in the Elderly. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 88(1):50–53, January 2007. ISSN 0003-9993. doi: 10.1016/j.apmr.2006.10.007. URL https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1894901/.

[12] Matthieu Gallou-Guyot, Stéphane Mandigout, Laure Combourieu-Donnezan, Louis Bherer, and Anaick Perrochon. Cognitive and physical impact of cognitive-motor dual-task training in cognitively impaired older adults: An overview. *Neurophysiologie Clinique*, 50(6): 441–453, October 2020. ISSN 0987-7053. doi: 10.1016/j.neucli.2020.10.010. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0987705320301209.

[13] Matthieu Gallou-Guyot, Stéphane Mandigout, Louis Bherer, and Anaïck Perrochon. 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*, page 101135, August 2020. ISSN 1568-1637. doi: 10.1016/j.arr.2020.101135. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568163720302701.

[14] Fernando L. Vázquez, Patricia Otero, J. Antonio García-Casal, Vanessa Blanco, Ángela J. Torres, and Manuel Arrojo. Efficacy of video game-based interventions for active aging. A systematic literature review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 13(12):e0208192, December 2018. ISSN 1932-6203. doi: 10.1371/journal.pone.0208192. URL https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0208192.

[15] Robert Stojan and Claudia Voelcker-Rehage. A Systematic Review on the Cognitive Benefits and Neurophysiological Correlates of Exergaming in Healthy Older Adults. *Journal of Clinical Medicine*, 8 (5), May 2019. ISSN 2077-0383. doi: 10.3390/jcm8050734.

[16] Lynne M. Taylor, Ngaire Kerse, Tara Frakking, and Ralph Maddison. Active Video Games for Improving Physical Performance Measures in Older People: A Meta-analysis. *Journal of Geriatric Physical Therapy (2001)*, 41(2):108–123, June 2018. ISSN 2152-0895. doi: 10.1519/JPT.0000000000000078.

[17] Lars Donath, Roland Rössler, and Oliver Faude. 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 (Auckland, N.Z.)*, 46(9):1293–1309, September 2016. ISSN 1179-2035. doi: 10.1007/s40279-016-0485-1.

[18] S.R. Nyman and C.R. Victor. Older people's recruitment, sustained participation, and adherence to falls prevention interventions in institutional settings: A supplement to the cochrane systematic review. *Age and Ageing*, 40(4):430–436, 2011. doi: 10.1093/ageing/afr016. URL https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79959536413&doi=10.1093%2fageing%2fafr016&partnerID=40&md5=b9e48a9d1e97c30eec1142520f797666.

[19] Lisbeth H. Larsen, Lone Schou, Henrik Hautop Lund, and Henning Langberg. The Physical Effect of Exergames in Healthy Elderly-A Systematic Review. *Games for Health Journal*, 2(4):205–212, August 2013. ISSN 2161-7856. doi: 10.1089/g4h.2013.0036.

[20] Sang D. Choi, Liangjie Guo, Donghun Kang, and Shuping Xiong. Exergame technology and interactive interventions for elderly fall prevention: A systematic literature review. *Applied Ergonomics*, 65: 570–581, November 2017. ISSN 00036870. doi: 10.1016/j.apergo.2016.10.013. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003687016302265.

[21] Pilar Toril, José M. Reales, and Soledad Ballesteros. Video game training enhances cognition of older adults: A meta-analytic study. *Psychology and Aging*, 29(3):706–716, 2014. ISSN 1939-1498, 0882-7974. doi: 10.1037/a0037507. URL http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/a0037507.

[22] Elizabeth J. Lyons. Cultivating Engagement and Enjoyment in Exergames Using Feedback, Challenge, and Rewards. *Games for Health Journal*, 4(1):12–18, October 2014. ISSN 2161-783X. doi: 10.1089/g4h.2014.0072. URL https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/g4h.2014.0072.

[23] Robin Mellecker, Elizabeth J. Lyons, and Tom Baranowski. Disentangling Fun and Enjoyment in Exergames Using an Expanded Design, Play, Experience Framework: A Narrative Review. *Games for Health Journal*, 2(3):142–149, May 2013. ISSN 2161-783X. doi: 10.1089/g4h.2013.0022. URL https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/g4h.2013.0022.

[24] Bruno Bonnechère, Bart Jansen, Lubos Omelina, and Serge Van Sint Jan. The use of commercial video games in rehabilitation: a systematic review. *International Journal of Rehabilitation Research. Internationale Zeitschrift Fur Rehabilitationsforschung. Revue Internationale De Recherches De Readaptation*, 39(4):277–290, December 2016. ISSN 1473-5660. doi: 10.1097/MRR.0000000000000190.

[25] Valeria Manera, Grégory Ben-Sadoun, Teun Aalbers, Hovannes Agopyan, Florence Askenazy, Michel Benoit, David Bensamoun, Jérémy Bourgeois, Jonathan Bredin, Francois Bremond, Carlos Crispim-Junior, Renaud David, Bob De Schutter, Eric Ettore, Jennifer Fairchild, Pierre Foulon, Adam Gazzaley, Auriane Gros, Stéphanie Hun, Frank Knoefel, Marcel Olde Rikkert, Minh K. Phan Tran, Antonios Politis, Anne S. Rigaud, Guillaume Sacco, Sylvie Serret, Susanne Thümmler, Marie L. Welter, and Philippe

Robert. Recommendations for the Use of Serious Games in Neurodegenerative Disorders: 2016 Delphi Panel. *Frontiers in Psychology*, 8:1243, July 2017. ISSN 1664-1078. doi: 10.3389/fpsyg.2017.01243. URL http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2017.01243/full.

[26] Philippe H. Robert, Alexandra KÃ¶nig, HÃ©lene Amieva, Sandrine Andrieu, FranÃ§ois Bremond, Roger Bullock, Mathieu Ceccaldi, Bruno Dubois, Serge Gauthier, Paul-Ariel Kenigsberg, StÃ©phane Nave, Jean M. Orgogozo, Julie Piano, Michel Benoit, Jacques Touchon, Bruno Vellas, Jerome Yesavage, and Valeria Manera. Recommendations for the use of Serious Games in people with Alzheimer's Disease, related disorders and frailty. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, March 2014. ISSN 1663-4365. doi: 10.3389/fnagi.2014.00054. URL http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnagi.2014.00054/abstract.

[27] Anaïck Perrochon, Stéphane Mandigout, Stacie Petruzzellis, Nicolas Soria Garcia, Mohamed Zaoui, Alain Berthoz, and Jean-Christophe Daviet. The influence of age in women in visuo-spatial memory in reaching and navigation tasks with and without landmarks. *Neuroscience Letters*, 684:13–17, September 2018. ISSN 1872-7972. doi: 10.1016/j.neulet.2018.06.054.

[28] Téo Kronovsek, Eric Hermand, Alain Berthoz, Alexander Castilla, Matthieu Gallou-Guyot, Jean-Christophe Daviet, and Anaick Perrochon. Age-related decline in visuo-spatial working memory is reflected by dorsolateral prefrontal activation and cognitive capabilities. *Behavioural Brain Research*, page 112981, November 2020. ISSN 01664328. doi: 10.1016/j.bbr.2020.112981. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016643282030680X.

[29] Matthieu Gallou-Guyot, Stéphane Mandigout, Justine Lacroix, Damien Ricard, Stéphane Buffat, Damien Archambeau, Gaétan Guéguin, and Anaïck Perrochon. Biopsychosocial determinants of visuospatial memory performance according to different spaces. *Neuroscience Research*, August 2020. ISSN 0168-0102. doi: 10.1016/j.neures.2020.07.012. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016801022030420X.

[30] Matthieu Gallou-Guyot, Anaick Perrochon, Fanny Thomas, and Stéphane Mandigout. Réentraîner les seniors à faire deux choses à la fois : le projet INCOME à Limoges. *Trayectorias Humanas Trascontinentales*, 11(2):488 ko, November 2021. doi: 10.25965/TRAHS.3945. URL https://www.unilim.fr/trahs/3945.

[31] Bob Woods, Laura O'Philbin, Emma M. Farrell, Aimee E. Spector, and Martin Orrell. Reminiscence therapy for dementia. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (3), 2018. ISSN 1465-1858. doi: 10.1002/14651858.CD001120.pub3. URL https://www.cochranelibrary.com/cdsr/doi/10.1002/14651858.CD001120.pub3/abstract. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.

[32] Maayan Agmon, Basia Belza, Huong Q. Nguyen, Rebecca Logsdon, and Vallerie E. Kelly. A systematic review of interventions conducted in clinical or community settings to improve dual-task postural control in older adults. *Clinical Interventions in Aging*, page 477, March 2014. ISSN 1178-1998. doi: 10.2147/CIA.S54978.

[33] Bettina Wollesen and Claudia Voelcker-Rehage. 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, April 2014. ISSN 1813-7253, 1861-6909. doi: 10.1007/s11556-013-0122-z. URL http://link.springer.com/10.1007/s11556-013-0122-z.

[34] Shashank Ghai, Ishan Ghai, and Alfred O Effenberg. Effects of dual tasks and dual-task training on postural stability: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 12:557–577, March 2017. ISSN 1178-1998. doi: 10.2147/CIA.S125201.

[35] D.L. Kappen, P. Mirza-Babaei, and L.E. Nacke. Older Adults' Physical Activity and Exergames: A Systematic Review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(2):140–167, 2019. doi: 10.1080/10447318.2018.1441253.

[36] Clémence Joubert and Hanna Chainay. Aging brain: the effect of combined cognitive and physical training on cognition as compared to cognitive and physical training alone – a systematic review. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 13:1267–1301, July 2018. ISSN 1178-1998. doi: 10.2147/CIA.S165399.

[37] Xinyi Zhu, Shufei Yin, Minjia Lang, Rongqiao He, and Juan Li. 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, November 2016. ISSN 15681637. doi: 10.1016/j.arr.2016.07.003. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568163716301593.

[38] Sarah A. Fraser, Karen Z.-H. Li, Nicolas Berryman, Laurence Desjardins-Crépeau, Maxime Lussier, Kiran Vadaga, Lora Lehr, Thien Tuong Minh Vu, Laurent Bosquet, and Louis Bherer. Does Combined Physical and Cognitive Training Improve Dual-Task Balance and Gait Outcomes in Sedentary Older Adults? *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, January 2017. ISSN 1662-5161. doi: 10.3389/fnhum.2016.00688. URL http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2016.00688/full.

[39] Andreas Lauenroth, Anestis E. Ioannidis, and Birgit Teichmann. Influence of combined physical and cognitive training on cognition: a systematic review. *BMC Geriatrics*, 16(1), December 2016. ISSN 1471-2318. doi: 10.1186/s12877-016-0315-1. URL http://bmcgeriatr.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12877-016-0315-1.

[40] Ying-Yu Chao, Yvonne K. Scherer, and Carolyn A. Montgomery. Effects of using Nintendo Wii™ exergames in older adults: a review of the literature. *Journal of Aging and Health*, 27(3):379–402, April 2015. ISSN 1552-6887. doi: 10.1177/0898264314551171.

[41] Adrián Borrego, Jorge Latorre, Mariano Alcañiz, and Roberto Llorens. Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for Virtual Reality-Based Exploration, Navigation, Exergaming, and Rehabilitation. *Games for Health Journal*, 7(3):151–156, June 2018. ISSN 2161-783X, 2161-7856. doi: 10.1089/g4h.2017.0114. URL http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/g4h.2017.0114.

[42] Daniel Schoene, Trinidad Valenzuela, Stephen R Lord, and Eling D de Bruin. The effect of interactive cognitive-motor training in reducing fall risk in older people: a systematic review. *BMC Geriatrics*, 14(1), December 2014. ISSN 1471-2318. doi: 10.1186/1471-2318-14-107. URL http://bmcgeriatr.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2318-14-107.

[43] ME Nelson, WJ Rejeski, SN Blair, PW Duncan, JO Judge, AC King, CA Macera, and C Castaneda-Sceppa. Physical Activity and Public Health in Older Adults: Recommendation From the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, 116(9):1094–1105, August 2007. ISSN 0009-7322, 1524-4539. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.185650. URL https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.185650.

[44] Stephen R. Lord and Jacqueline C. T. Close. New horizons in falls prevention. *Age and Ageing*, 47(4):492–498, July 2018. ISSN 1468-2834. doi: 10.1093/ageing/afy059.

[45] Freja Gheysen, Louise Poppe, Ann DeSmet, Stephan Swinnen, Greet Cardon, Ilse De Bourdeaudhuij, Sebastien Chastin, and Wim Fias. 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), December 2018. ISSN 1479-5868. doi: 10.1186/s12966-018-0697-x. URL https://ijbnpa.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12966-018-0697-x.

[46] Jamie L. Tait, Rachel L. Duckham, Catherine M. Milte, Luana C. Main, and Robin M. Daly. Influence of Sequential vs. Simultaneous Dual-Task Exercise Training on Cognitive Function in Older Adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, November 2017. ISSN 1663-4365. doi: 10.3389/fnagi.2017.00368. URL http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnagi.2017.00368/full.

[47] Matthieu Gallou-Guyot, Anaick Perrochon, Romain Marie, Maxence Bourgeois, and Stephane Mandigout. Measured and perceived exercise intensity during the performance of single-task, cognitive-motor dual-task and exergame training: a transversal study (Preprint). *JMIR Preprints*, January 2022. doi: 10.2196/preprints.36126. URL http://preprints.jmir.org/preprint/36126.

[48] Halina Bruce, Laurence Lai, Louis Bherer, Maxime Lussier, Nancy St.-Onge, and Karen Z.H. Li. The effect of simultaneously and sequentially delivered cognitive and aerobic training on mobility among older adults with hearing loss. *Gait & Posture*, 67: 262–268, January 2019. ISSN 09666362. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.10.020. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966636218317211.

[49] Mylène C. Dault and James S. Frank. Does Practice Modify the Relationship between Postural Control and the Execution of a Secondary Task in Young and Older Individuals? *Gerontology*, 50(3):157–164, 2004. ISSN 0304-324X, 1423-0003. doi: 10.1159/000076773. URL https://www.karger.com/Article/FullText/76773.

[50] Michail Doumas, Caroline Smolders, and Ralf Th. Krampe. Task prioritization in aging: effects of sensory information on concurrent posture and memory performance. *Experimental Brain Research*, 187(2):275–281, May 2008. ISSN 0014-4819, 1432-1106. doi: 10.1007/s00221-008-1302-3. URL http://link.springer.com/10.1007/s00221-008-1302-3.

[51] Eric Heiden and Yves Lajoie. Games-based biofeedback training and the attentional demands of balance in older adults. *Aging Clinical and Experimental Research*, 22(5-6), October 2010. doi: 10.3275/6733. URL http://doi.org/10.3275/6733.

[52] Makoto Hiyamizu, Shu Morioka, Koji Shomoto, and Tomoaki Shimada. Effects of dual task balance training on dual task performance in elderly people: a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 26(1):58–67, January 2012. ISSN 0269-2155, 1477-0873. doi: 10.1177/0269215510394222. URL http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0269215510394222.

[53] Itshak Melzer and Lars IE Oddsson. Improving balance control and self-reported lower extremity function in community-dwelling older adults: a randomized control trial. *Clinical Rehabilitation*, 27 (3):195–206, March 2013. ISSN 0269-2155, 1477-0873. doi: 10.1177/0269215512450295. URL http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0269215512450295.

[54] Kazuki Uemura, Minoru Yamada, Koutatsu Nagai, Hiroshige Tateuchi, Shuhei Mori, Buichi Tanaka, and Noriaki Ichihashi. Effects of dual-task switch exercise on gait and gait initiation performance in older adults: Preliminary results of a randomized controlled trial. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 54(2):e167–e171, March 2012. ISSN 01674943. doi: 10.1016/j.archger.2012.01.002. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167494312000039.

[55] Kelly P Westlake and Elsie G Culham. Sensory-Specific Balance Training in Older Adults: Effect on Proprioceptive Reintegration and Cognitive Demands. *Physical Therapy*, 87(10):1274–1283, October 2007. ISSN 0031-9023, 1538-6724. doi: 10.2522/ptj.20060263. URL https://academic.oup.com/ptj/article/87/10/1274/2742228.

[56] J. R. Stroop. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6):643–662, 1935. ISSN 0022-1015(Print). doi: 10.1037/h0054651.

[57] Ralph M. Reitan. Validity of the Trail Making Test as an Indicator of Organic Brain Damage. *Perceptual and Motor Skills*, 8(3):271–276, December 1958. ISSN 0031-5125. doi: 10.2466/pms.1958.8.3.271. URL https://doi.org/10.2466/pms.1958.8.3.271.

[58] W. K. Kirchner. Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55(4):352–358, April 1958. ISSN 0022-1015. doi: 10.1037/h0043688.

[59] Diane Podsiadlo and Sandra Richardson. The Timed "Up & Go": A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. *Journal of the American Geriatrics Society*, 39(2):142–148, 1991. ISSN 1532-5415. doi: 10.1111/j.1532-5415.1991.tb01616.x. URL https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1532-5415.1991.tb01616.x.

[60] Katherine Berg, Sharon Wood-Dauphine, J. I. Williams, and David Gayton. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. *Physiotherapy Canada*, April 1989. doi: 10.3138/ptc.41.6.304. URL https://www.utpjournals.press/doi/abs/10.3138/ptc.41.6.304.

[61] Seong-Hi Park. Tools for assessing fall risk in the elderly: a systematic review and meta-analysis. *Aging Clinical and Experimental Research*, 30(1):1–16, January 2018. ISSN 1720-8319. doi: 10.1007/s40520-017-0749-0. URL http://link.springer.com/10.1007/s40520-017-0749-0.

[62] Lucy Yardley, Nina Beyer, Klaus Hauer, Gertrudis Kempen, Chantal Piot-Ziegler, and Chris Todd. Development and initial validation of the Falls Efficacy Scale-International (FES-I). *Age and Ageing*, 34(6): 614–619, November 2005. ISSN 0002-0729. doi: 10.1093/ageing/afi196. URL https://academic.oup.com/ageing/article/34/6/614/40464.

[63] P. de Souto Barreto, A. M. Ferrandez, and B. Saliba-Serre. 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, February 2011. ISSN 0765-1597. doi: 10.1016/j.scispo.2010.09.006. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0765159710001243.

[64] Dawn C. Mackey, Todd M. Manini, Dale A. Schoeller, Annemarie Koster, Nancy W. Glynn, Bret H. Goodpaster, Suzanne Satterfield, Anne B. Newman, Tamara B. Harris, and Steven R. Cummings. Validation of an Armband to Measure Daily Energy Expenditure

in Older Adults. *The Journals of Gerontology: Series A*, 66A(10):1108–1113, October 2011. ISSN 1079-5006. doi: 10.1093/gerona/glr101. URL https://academic.oup.com/biomedgerontology/article/66A/10/1108/686056.

[65] M. F. Janssen, A. Simon Pickard, Dominik Golicki, Claire Gudex, Maciej Niewada, Luciana Scalone, Paul Swinburn, and Jan Busschbach. Measurement properties of the EQ-5D-5L compared to the EQ-5D-3L across eight patient groups: a multi-country study. *Quality of Life Research: An International Journal of Quality of Life Aspects of Treatment, Care and Rehabilitation*, 22(7):1717–1727, September 2013. ISSN 1573-2649. doi: 10.1007/s11136-012-0322-4.

[66] Julie Boiché, Mathieu Gourlan, David Trouilloud, and Philippe Sarrazin. Development and validation of the 'Echelle de Motivation envers l'Activité Physique en contexte de Santé': A motivation scale towards health-oriented physical activity in French:. *Journal of Health Psychology*, November 2016. doi: 10.1177/1359105316676626. URL https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1359105316676626. Publisher: SAGE PublicationsSage UK: London, England.

[67] Sarah C. Howes, Darryl K. Charles, Joanne Marley, Katy Pedlow, and Suzanne M. McDonough. 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, December 2017. ISSN 0031-9023, 1538-6724. doi: 10.1093/ptj/pzx088. URL http://academic.oup.com/ptj/article/97/12/1122/4097725.

[68] Silvia Gr Neri, Jefferson R. Cardoso, Lorena Cruz, Ricardo M. Lima, Ricardo J. de Oliveira, Maura D. Iversen, and Rodrigo L. Carregaro. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*, 31(10):1292–1304, October 2017. ISSN 1477-0873. doi: 10.1177/0269215517694677.

[69] Elisa F. Ogawa, Haikun Huang, Lap-Fai Yu, Philimon N. Gona, Richard K. Fleming, Suzanne G. Leveille, and Tongjian You. Effects of Exergaming on Cognition and Gait in Older Adults at Risk for Falling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(3):754–761, March 2020. ISSN 1530-0315. doi: 10.1249/MSS.0000000000002167.

[70] Tom Delbroek, Wietse Vermeylen, and Joke Spildooren. The effect of cognitive-motor dual task training with the biorescue force platform on cognition, balance and dual task performance in institutionalized older adults: a randomized controlled trial. *Journal of Physical Therapy Science*, 29(7):1137–1143, July 2017. ISSN 0915-5287. doi: 10.1589/jpts.29.1137.

Annexe 4. Retour d’expérience des acteurs de notre exergame

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Trayectorias Humanas Trascontinentales

Réentraîner les seniors à faire deux choses à la fois : le projet INCOME à Limoges

Dual-task training in elderly: the Limoges INCOME project

Matthieu GALLOU-GUYOT[1]

Unité de recherche HAVAE (EA 6310)
Université de Limoges, France

https://orcid.org/0000-0002-2616-4850

matthieu.gallou-guyot@unilim.fr

Anaick PERROCHON[2]

Unité de recherche HAVAE (EA 6310)
Université de Limoges, France

https://orcid.org/0000-0001-6915-2094

anaick.perrochon@unilim.fr

Fanny THOMAS[3]

ARISE'UP / OXALIS SCOP
Unité de recherche HAVAE (EA 6310)
Université de Limoges, France

https://orcid.org/0000-0001-7088-0136

fanny.thomas11@gmail.com

Stéphane MANDIGOUT[4]

Unité de recherche HAVAE (EA 6310)
Université de Limoges, France

https://orcid.org/0000-0003-2072-3022

stephane.mandigout@unilim.fr

URL : https://www.unilim.fr/trahs/3945

DOI : 10.25965/trahs.3945

Licence : CC BY-NC-ND 4.0 International

Résumé : Le vieillissement s'accompagne d'une diminution des capacités cognitives et motrices, représentant une augmentation du risque de chutes. Nous pouvons pallier cette dégradation par le biais d'entraînements spécifiques ; toutefois, les seniors peuvent manquer de motivation à entamer, poursuivre et respecter ces programmes d'entraînements. Une solution possible est le passage par les jeux

[1] Masseur-kinésithérapeute

[2] Enseignant-chercheur habilité à diriger des recherches.

[3] Docteur, consultante au sein du cabinet ARISE-UP, chercheur associé unité de HAVAE (EA 6310).

[4] Enseignant-chercheur habilité à diriger des recherches.

vidéo. L'objectif du projet INCOME est d'évaluer les effets d'un programme d'entraînement ayant pour support un exergame sur différents paramètres chez des personnes âgées vivant en résidence autonomie municipale de la Ville de Limoges. Pour répondre aux besoins spécifiques des seniors, l'unité de recherche HAVAE et l'école 3iL ont conceptualisé et développé un exergame. Une étude pilote exploratoire teste ce jeu auprès de 40 personnes âgées via un entraînement de 30 minutes, 3 fois par semaines durant 3 mois. Ici, nous décrivons le contexte scientifique, la genèse et le contenu du projet, ainsi que des résultats préliminaires concernant la réception de ce jeu par le public.

Mots clés : exergame, âgés, cognition, équilibre, adhésion

Abstract: Ageing is associated with a decrease of cognitive and motor functions, both being risk of fall factors. We can face this degradation through specific trainings; however, seniors suffer from a lack of motivation to start and pursue physical training programs. A possible solution is the use of video games. The objective of the INCOME project is to assess the effects of a training program using an exergame as support on several parameters in seniors living in Limoges' autonomy residences. To meet the specific needs of seniors, the HAVAE laboratory and the 3iL engineering school have conceptualised and developed an exergame. A pilot exploratory study is assessing the effects of this exergame amongst 40 seniors, training 30 minutes, 3 times a week for 3 months. Here, we describe the scientific background, the genesis and the content of the project, and preliminary results regarding the seniors' adhesion to our exergame.

Keywords: exergame, seniors, cognition, balance, adhesion

« Vivre, c'est vieillir, rien de plus. »
Simone de Beauvoir

Introduction

Le vieillissement constant de la population s'accompagne d'un défi pour le maintien des capacités physiques et cognitives des seniors. Les modalités d'entraînement pourraient bien être la clef, tant sur la forme que sur le fond. Ainsi, nous réalisons le projet INCOME (pour INterférence COgnitivo-Motrice Exercice) qui est un nouvel « exergame » (jeu sous forme d'exercice) pour des personnes âgées. INCOME est à la croisée des thématiques du congrès ALEC, rassemblant à la fois le « bien vieillir », les technologies, les politiques publiques, les transmissions et la mémoire, les institutions, le territoire, et évidement l'impact du COVID, le tout par le biais d'une étude clinique.

Contexte scientifique : pourquoi mener cette étude ?

Vieillissement et cognition

Si la vieillesse est un état, le vieillissement est un processus, une progression lente que l'on nomme sénescence. Cette sénescence n'est pas spécifique à la fin de vie, mais débute tôt. Le vieillissement concerne l'ensemble des systèmes du corps humain (musculaire, osseux, nerveux, cardiovasculaires etc...). Les conséquences de ce vieillissement sont une dégradation des capacités cognitives et motrices, contribuant au handicap et à la perte d'autonomie des seniors (Anton et al., 2015). Parmi les paramètres physiques diminuant avec l'âge se trouvent la perte de force musculaire, la diminution de l'équilibre postural ainsi que la perte de mobilité (Al-Aama, 2011 ; Deandrea et al., 2010), qui sont des facteurs de risque de chutes. D'un point de vue cognitif, la dégradation des fonctions exécutives[5], du temps de réaction et de la vitesse de traitement de l'information sont également des facteurs de risque de chute (Segev-Jacubovski et al., 2011). Cette sénescence correspond à la représentation que l'on se fait des personnes âgées : fermez les yeux, et imaginez une personne recroquevillée sur elle-même, se déplaçant lentement et rattrapant sans cesse son équilibre, cherchant ses mots et ses souvenirs.

Irréversible, potentiellement lié à des pathologies, quasi systématiquement visible, le vieillissement est un phénomène qui peut toutefois être ralenti – c'est ce que nous appelons depuis quelques années le « bien vieillir ». » Bien vieillir » signifie préserver ses capacités afin de retarder le franchissement d'un seuil de dépendance, pour rester autonome et socialement actif le plus longtemps possible. Ceci est possible par l'entraînement, qu'il soit cognitif ou physique : exercices de mémoire, de l'attention, ou bien de l'endurance, de la force musculaire, de l'équilibre ou de la coordination. Afin de maximiser les résultats, il a rapidement été proposé de combiner les deux modalités par le biais d'entraînements en double tâche. Il est alors demandé aux personnes de réaliser deux exercices en même temps : à nouveau, fermez les yeux, et imaginez-vous en train de réaliser des squats tout en résolvant un problème mathématique.

Ces tâches étant plus complexes, elles permettent de mieux entraîner les seniors en leur demandant plus que ce qu'ils ne font déjà au quotidien (Gallou-Guyot et al.,

5 Fonctions cérébrales supérieures permettant l'adaptation continue et la résolution de problèmes nouveaux par l'acquisition et le traitement de l'information.

2020a ; Gallou-Guyot et al., 2020b). Les entraînements en double tâche sont d'autant plus pertinents chez les seniors que l'avancée en âge est associée à une diminution de la capacité à réaliser deux tâches simultanées, l'une cognitive et l'autre motrice – c'est ce que nous appelons l'interférence cognitivo-motrice. Elle s'explique par un dépassement des capacités attentionnelles[6] (Montero-Odasso et al., 2012 ; Yogev-Seligmann et al., 2008). Cette incapacité à réaliser deux tâches simultanées est aussi un prédicteur des chutes chez les seniors (Beauchet et al., 2007 ; Verghese et al., 2007).

Le maintien de l'activité physique : les jeux comme solution ?

Les entraînements en double tâche sont efficaces chez les seniors. Cependant les entraînements physiques sont sujets à un certain nombre de barrières, altérant le maintien de la pratique d'activités physique (Baert et al., 2011 ; Campo et al., 2015 ; Nigg et al., 2008). Ces barrières peuvent appartenir au domaine intrapersonnel (ex : manque de temps, fatigue, peur, motivation[7]), au domaine interpersonnel (ex : solitude dans la pratique, affecte pour l'animateur), ou encore au domaine communautaire (ex : contraintes temporelles ou spatiales).

Les entraînements en double tâche peuvent prendre différentes formes, comme la gymnastique, la danse, ou bien utiliser les jeux vidéo comme support. Parmi ces jeux, un certain type appelé « *exergames* » nécessitent une activité physique pour être pratiqués – pensez à la Nintendo® Wii ou Microsoft® Kinect. Ils ont l'avantage d'aller à l'encontre d'un certain nombre de freins : ludiques et « funs », ils présentent un fort taux d'adhésion auprès des seniors (Campelo & Katz, 2020). Ils peuvent être modulés à volonté, tant sur la forme que sur le fond, afin d'être aussi captivants qu'une télévision et d'une intensité comprise entre la « gym douce » et des programmes à haute intensité tels que le *cross-fit*.

Gratuit et mis à disposition à domicile dans le cadre de notre étude, notre jeu est pratiqué en groupe (Watson et al., 2004) et animé par des experts (Wolff et al., 2014). Nous nous servons donc de paramètres intrapersonnels, interpersonnels et communautaires pour proposer des leviers aux barrières de la pratique d'activité physique. C'est dans ce contexte que nous nous sommes demandé si un exergame permettrait de répondre aux besoins d'exercice spécifiques aux seniors sur les plans cognitifs et moteurs, tout en étant sûr, peu dangereux, et suffisamment agréable et stimulant pour remporter leur adhésion. Le projet INCOME regroupe la conceptualisation, le développement et l'évaluation de ce type de jeu.

Genèse du projet INCOME

La municipalité de Limoges s'est positionnée depuis plusieurs années comme une « terre d'expérimentation », élaborant des collaborations de recherche et de développement avec des entreprises ou des universités : programmes d'activité

6 Les capacités attentionnelles peuvent être visualisées comme un capital d'attention limité. Lorsque l'on dépasse sa valeur seuil, il faut alors cesser certaines tâches consommatrices d'attention.

7 La motivation est un terme valise qui regroupe un certain nombre de notions. Ainsi, pour un même programme on parle à la fois d'adhésion pour sa capacité à intéresser les participants (qu'ils « entrent » dans le programme), de compliance pour sa capacité à être respecté (qu'ils réalisent le contenu prévu), de complétion pour sa capacité à être réalisé jusqu'à son terme, et de satisfaction suivant ce que les participants en auront pensé.

physique adaptée, lutte contre les perturbateurs endocriniens, amélioration de l'accessibilité, etc. Cette politique publique s'exprime ici au sein de résidences autonomies municipales (RAM), lieux de vie réservés à des seniors autonomes.

Ainsi, nous avons mis en place un partenariat impliquant de nombreux acteurs locaux : la Ville de Limoges s'est associée à l'unité de recherche HAVAE de l'Université de Limoges en recrutant un doctorant salarié. Le CHU de Limoges s'est porté promoteur de cette étude, tandis que des étudiants de l'école 3iL et de l'ILFOMER ont participé respectivement au développement du jeu et à sa mise en place. Enfin, ce sont des animateurs municipaux qui utilisent ce jeu en proposant des séances aux seniors de RAM ou membres de clubs seniors de la Ville de Limoges.

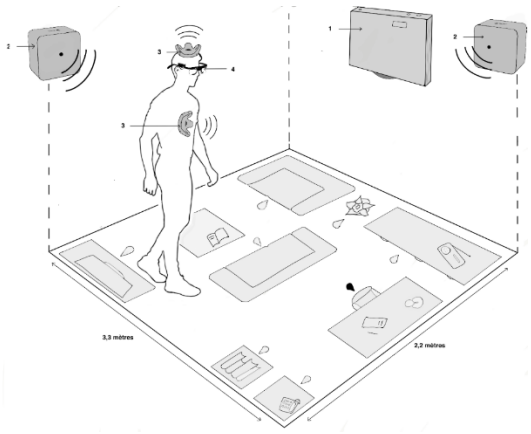
Conceptualisation et développement : comment passer d'un projet à un jeu ?

Un travail collaboratif entre les différents acteurs a permis de passer d'un concept à une maquette. Nous avions un cadre pour nous aiguiller : des impératifs de recherche et un idéal scientifique, une expérience issue de travaux antérieurs, ainsi que des limitations techniques et pratiques. Il fallait donc que le jeu soit collaboratif plutôt que compétitif, qu'il ne soit pas pénalisant ni stigmatisant, qu'il soit lisible, visible, clair, que les consignes soient simples et compréhensibles (Chao et al., 2015). Il fallait évidement qu'il soit sûr et ne mette pas en danger les participants, tout en étant suffisamment difficile pour être sollicitant sur le plan cognitif comme moteur. Il fallait également qu'il soit suffisamment facile à prendre en main pour être utilisé par n'importe qui. Enfin, il devait être développé dans le temps imparti et selon les moyens humains à notre disposition. Pas simple aux vues des contraintes d'obtenir ne serait-ce qu'un prototype…

Des idées aux lignes de code

Nous ne sommes pas partis d'une copie vierge, car nous possédions une technologie (ou *hardware*) préalablement développée en interne et éprouvée : le « Tapis Virtuel » (Gallou-Guyot et al., 2020c ; Kronovsek et al., 2020 ; Perrochon et al., 2018). Le « Tapis Virtuel » est une association entre une scène vidéo projetée au sol, et un système de suivi des mouvements à l'aide du dispositif HTC® Vive permettant des interactions avec l'écran. Mais il nous manquait les compétences pour développer un *software* et ainsi obtenir notre exergame final.

« Tapis Virtuel », constitué de l'association entre un vidéoprojecteur (1), ainsi que les caméras (2) et traqueurs (3) HTC Vive ®



Source : Matthieu Gallou-Guyot

Nous avons donc défini un cahier des charges du livrable que nous souhaitions obtenir, et répondu à un appel à projets au sein de l'école 3iL. Nous voulions un jeu collaboratif répondant à nos besoins, basé sur un ensemble de mini-jeux qui s'enchaînent et se suivent à la manière de Mario Party®, le Tapis Virtuel permettant les changements d'interface suivant la position des joueurs dans l'aire de jeu.

Il s'agit d'une superposition de deux logiciels : Steam® VR qui permet l'utilisation de l'HTC® Vive et la reconnaissance des traqueurs portés par les joueurs dans l'espace réel, ainsi que Unity® qui permet de transposer ces traqueurs dans un univers virtuel et graphique, afin de projeter cet univers au sol comme aire de jeu. Ce sont cette surcouche logicielle, cette interface utilisateur et la logique algorithmique en arrière-plan qui ont été développées par 3iL, en traduisant le concept en code.

Mode de fonctionnement de l'exergame

Notre jeu est collectif : 4 participants s'entraînent en jouant en groupe, et sont les propres pions de ce jeu de plateau. Ils se déplacent dans l'espace représentant la ville de Limoges, et doivent à tour de rôle se rendre sur un point d'intérêt (un parc, un bâtiment, un lieu de vie de la ville), ce qui déclenche un mini-jeu. Ils doivent alors accomplir cette activité en groupe, et marquer des points collectivement en réalisant les actions demandées dans chaque mini-jeu, comme suivre un enchaînement de flèches affichées, tout en construisant un mot en ajoutant une lettre chacun leur tour. Chaque mini-jeu consiste en environ 3 minutes de double tâche simultanée, et ils s'enchaînent durant 30 minutes. Le score global de la séance, qui doit être le plus élevé possible, correspond à la somme des scores de chaque participant. L'utilisation du patrimoine culturel de la Ville de Limoges est au centre de notre jeu. L'objectif est d'augmenter l'adhésion et l'immersion au jeu, mais aussi d'encourager les participants à sortir de chez eux et redécouvrir ces lieux, et donc à augmenter leurs niveaux d'activité physique. Ce moyen de levier d'incitation à l'activité physique est inspiré de la théorie de la réminiscence (Woods et al., 2018).

Utilisation de l'exergame utilisé dans le cadre du projet INCOME, avec un vidéoprojecteur (1), ainsi que des caméras (2) et traqueurs (4) HTC Vive ®, et une unité centrale (3).

Source : Matthieu Gallou-Guyot

Exercices physiques et cognitifs

Notre exergame est composé de 3 types de mini-jeux différents : l'un est un exercice de passage du pas rythmique, l'autre est un exercice de navigation dans l'espace, et le dernier est un exercice de coordination motrice et de réflexes. Ces jeux sont proposés à chaque séance dans un ordre aléatoire déterminé par l'algorithme du jeu. Sur ces thématiques générales s'ajoutent des consignes données par l'animateur : on peut demander aux joueurs de réaliser des exercices d'équilibre, de renforcement musculaire, de vitesse de réaction, et dans le même temps de réfléchir, parler, compter, résoudre des problèmes, etc. Ainsi, nous sollicitons les fonctions motrices et cognitives des joueurs, simultanément.

Mise en place du protocole : comment passer du jeu à l'entraînement ?

Nous avons à disposition un outil fonctionnel ainsi que des exercices d'entraînement correspondant à nos attentes, constituant à eux deux notre exergame. Nous devons maintenant tester cet exergame, c'est-à-dire savoir s'il est utilisable, facile, compréhensible, apprécié, non dangereux, et surtout utile. Pour cela, nous proposons d'organiser un programme d'entraînement à destination des seniors de la Ville de Limoges. Ce protocole sera composé de 3 sessions d'entraînement de 30 minutes par semaine, pendant 3 mois.

Nous évaluerons si les participants sont intéressés, s'ils viennent aux séances programmées jusqu'au terme, et s'ils progressent sur les plans cognitifs et moteurs. Nous aimerions aussi savoir si le programme d'entraînement a permis de modifier les comportements en lien avec l'activité physique entrainant un cercle vertueux : des individus en meilleure forme, plus prompts à sortir de chez eux pour explorer ou redécouvrir la ville. Après avoir formé les animateurs des RAM à l'utilisation de l'outil et à l'animation des séances, le protocole a pu débuter en mai 2021.

Illustration d'une séance réalisée par des seniors. Ici, deux personnes s'entraînent au passage du pas en dansant en rythme, tout en répondant à des questions.

Source : Ville de Limoges © Laurent Lagarde

Résultats préliminaires

Notre premier résultat est que parmi près de 140 résidents, 31 étaient éligibles pour participer à l'étude selon nos critères d'inclusion, dont 28 ont accepté de participer. Ainsi, il semblerait que l'acceptation de notre jeu soit bonne – sûrement renforcée par les différents confinements, couvre-feu et suppressions d'activités liés à la pandémie de COVID-19. Il est important de garder en tête que ces chiffres peuvent évoluer, car les participants abandonnent parfois l'entrainement en cours. De plus, nous ne sommes pas assurés d'obtenir la même acceptation lors que nous proposerons notre jeu à une population plus large, donc présentant plus de troubles physiques et cognitifs.

En interrogeant les joueurs lors de leurs premières séances de jeu, nous avons appris que l'esthétique du jeu venait de la projection au sol, attirante et ludique, et non des graphismes eux-mêmes. Si les images de lieux de la ville semblaient accessoires, elles permettaient parfois des réminiscences intégratives de souvenirs, très positives. Lors des jeux, les participants exprimaient une satisfaction à bouger, une réduction de l'ennui, une joie d'apprendre de nouvelles règles et exercices. Nous avons également pu constater une identification de la part des joueurs de leurs capacités physiques et cognitives : besoin ou non d'une chaise, d'une canne, gestion de leur fatigue, etc. Le temps d'attente avant le jeu était l'occasion de déposer des angoisses de mort, de perte d'autonomie ou de capacités, tandis que le temps du jeu lui-même entrainait des échanges tournés vers le maintien de l'identité et le lien social.

Enfin, l'information la plus importante que nous retirons de ces observations est que les animateurs sont la clef de voûte indispensable au programme d'entraînement. Les personnes ne venaient pas interagir avec l'exergame, parfois un peu avec les autres participants, mais surtout avec l'animateur vers lequel toutes les interrogations et tous les échanges étaient tournés. La plupart des interactions observées semblaient évoquer une complicité entre les animateurs et les participants, inscrivant ainsi le jeu dans l'histoire d'une relation déjà constituée et ouvrant toutes les perspectives au maintien de l'activité. Enfin, l'animateur était d'un point de vue physique un garant de sécurité mais surtout de reconnaissance.

Conclusion

Depuis 2019, nous avons réussi à conceptualiser, développer et déployer auprès de seniors résidents de la Ville de Limoges un programme d'entraînement reposant sur un exergame. En attendant les résultats finaux concernant l'efficacité de ce dispositif, il semble être bien reçu, et représenter une activité plaisante et appréciée par les résidents participants. Ceci repose probablement sur tous les facteurs motivationnels inhérent à notre jeu, basé volontairement sur des leviers connus pour le maintien de l'activité physique. À l'avenir, ce dispositif pourrait être une alternative, un nouvel outil disponible pour les animateurs et entraîneurs, mais surtout une nouvelle façon de s'entraîner tout en jouant, pour les seniors.

Références

Al-Aama, T. (2011). "Falls in the elderly: Spectrum and prevention". *Canadian Family Physician Medecin De Famille Canadien*, *57*(7), 771–776.

Anton, S. D., Woods, A. J., Ashizawa, T., Barb, D., Buford, T. W., Carter, C. S., Clark, D. J., Cohen, R. A., Corbett, D. B., Cruz-Almeida, Y., Dotson, V., Ebner, N., Efron, P. A., Fillingim, R. B., Foster, T. C., Gundermann, D. M., Joseph, A.-M.,

Karabetian, C., Leeuwenburgh, C., ... Pahor, M. (2015). "Successful aging: Advancing the science of physical independence in older adults." *Ageing Research Reviews*, *24*, 304–327. https://doi.org/10.1016/j.arr.2015.09.005

Baert, V., Gorus, E., Mets, T., Geerts, C., & Bautmans, I. (2011). "Motivators and barriers for physical activity in the oldest old: A systematic review." *Ageing Research Reviews*, *10*(4), 464–474. https://doi.org/10.1016/j.arr.2011.04.001

Beauchet, O., Dubost, V., Allali, G., Gonthier, R., Hermann, F. R., & Kressig, R. W. (2007). "'Faster counting while walking' as a predictor of falls in older adults." *Age and Ageing*, *36*(4), 418–423. https://doi.org/10.1093/ageing/afm011

Campelo, A. M., & Katz, L. (2020). "Older Adults' Perceptions of the Usefulness of Technologies for Engaging in Physical Activity: Using Focus Groups to Explore Physical Literacy." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(4), 1144. https://doi.org/10.3390/ijerph17041144

Campo, M., Louvet, B., Dosseville, F., Ferrand, C., Hagger, M., Martinent, G., Nicolas, M., Reguer, D., & Sanchez, X. (2015). "Promotion de l'activité physique chez les seniors. Revue systématique des programmes d'intervention centrés sur les barrières affectives." *Staps*, *n° 110*(4), 115–127.

Chao, Y.-Y., RN, GNP-BC, PhD, Scherer, Y. K., RN, EdD, & Montgomery, C. A., PhD, ANP-C, GNP. (2015). "Effects of Using Nintendo Wii(TM) Exergames in Older Adults: A Review of the Literature. "*Journal of Aging and Health*, *27*(3), 379. ProQuest Central.

Deandrea, S., Lucenteforte, E., Bravi, F., Foschi, R., La Vecchia, C., & Negri, E. (2010). "Risk Factors for Falls in Community-dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-analysis." *Epidemiology*, *21*(5), 658–668. https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181e89905

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*, 101135. https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101135

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Combourieu-Donnezan, L., Bherer, L., & Perrochon, A. (2020). "Cognitive and physical impact of cognitive-motor dual-task training in cognitively impaired older adults: An overview." *Neurophysiologie Clinique*. https://doi.org/10.1016/j.neucli.2020.10.010

Gallou-Guyot, M., Mandigout, S., Lacroix, J., Ricard, D., Buffat, S., Archambeau, D., Guéguin, G., & Perrochon, A. (2020). "Biopsychosocial determinants of visuospatial memory performance according to different spaces." *Neuroscience Research*. https://doi.org/10.1016/j.neures.2020.07.012

Kronovsek, T., Hermand, E., Berthoz, A., Castilla, A., Gallou-Guyot, M., Daviet, J.-C., & Perrochon, A. (2020). "Age-related decline in visuo-spatial working memory is reflected by dorsolateral prefrontal activation and cognitive capabilities." *Behavioural Brain Research*, 112981. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112981

Montero-Odasso, M., Verghese, J., Beauchet, O., & Hausdorff, J. M. (2012). "Gait and cognition: A complementary approach to understanding brain function

and the risk of falling." *Journal of the American Geriatrics Society*, *60*(11), 2127–2136. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2012.04209.x

Nigg, C. R., Borrelli, B., Maddock, J., & Dishman, R. K. (2008). "A Theory of Physical Activity Maintenance." *Applied Psychology*, *57*(4), 544–560. https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2008.00343.x

Perrochon, A., Mandigout, S., Petruzzellis, S., Soria Garcia, N., Zaoui, M., Berthoz, A., & Daviet, J. C. (2018). "The influence of age in women in visuo-spatial memory in reaching and navigation tasks with and without landmarks." *Neuroscience Letters*, *684*, 13–17. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.06.054

Segev-Jacubovski, O., Herman, T., Yogev-Seligmann, G., Mirelman, A., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2011). "The interplay between gait, falls and cognition: Can cognitive therapy reduce fall risk?" *Expert Review of Neurotherapeutics*, *11*(7), 1057–1075. Scopus. https://doi.org/10.1586/ern.11.69

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

Watson, J. D., PhD, K. A. M. G., & PhD, K. S. S. (2004). "Team Building in an Exercise Class for the Elderly." *Activities, Adaptation & Aging*, *28*(3), 35–47. https://doi.org/10.1300/J016v28n03_03

Wolff, J. K., Warner, L. M., Ziegelmann, J. P., & Wurm, S. (2014). "What do targeting positive views on ageing add to a physical activity intervention in older adults? Results from a randomised controlled trial." *Psychology & Health*, *29*(8), 915–932. https://doi.org/10.1080/08870446.2014.896464

Woods, B., O'Philbin, L., Farrell, E., Spector, A., & Orrell, M. (2018). "Reminiscence therapy for dementia." *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *3*. https://doi.org/10.1002/14651858.CD001120.pub3

Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J. M., & Giladi, N. (2008). "The role of executive function and attention in gait." *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, *23*(3), 329–342; quiz 472. https://doi.org/10.1002/mds.21720

Conception, développement et évaluation d'un exergame personnalisé sur les capacités cognitivo-motrices de séniors : le projet INCOME

Le vieillissement entraîne un déclin des capacités cognitives, motrices, et à réaliser deux tâches simultanément (doubles tâches). Ces altérations peuvent augmenter les risques de chutes, la perte d'autonomie, voire la dégradation de la qualité de vie. Dans ce contexte, nous savons que les entraînements en doubles tâches sont efficaces pour maintenir ces fonctions. Le passage par le jeu dans les programmes d'entraînement (*exergames*) permet de motiver les participants et de maintenir leur engagement. L'objectif de notre travail était de concevoir, développer et évaluer l'efficacité d'un *exergame* personnalisé reposant sur le concept de l'interférence cognitivo-motrice auprès de séniors. Après avoir mesuré l'intensité de la sollicitation physique de cet *exergame*, nous avons évalué son efficacité à court et moyen terme pour l'amélioration des capacités cognitives, motrices et de doubles tâches chez des personnes âgées. Nous avons également mesuré l'impact de cet entraînement sur le niveau d'activité physique, la motivation, la peur de tomber et la qualité de vie des participants. Enfin, nous avons étudié le niveau de sécurité et d'adhérence de ce jeu. Nous avons ainsi montré que notre *exergame* était fonctionnel, utilisable comme support d'entraînement, sûr et apprécié par tous ses utilisateurs (participants comme animateurs). Nous avons également montré que cet *exergame* d'intensité modérée entrainait une amélioration des fonctions cognitives et un maintien des fonctions motrices des séniors. Ce projet répond aux enjeux actuels de meilleure compréhension de l'efficacité des *exergames* personnalisés et ouvre de nouvelles perspectives sur cette thématique.

Mots-clés : Double-tâche, *exergame*, entraînement cognitif, entraînement moteur, séniors

Conception, development and evaluation of a personalized exergame on the cognitive-motor abilities of seniors : the INCOME project

Ageing is associated with cognitive, motor and dual-task abilities decline. These losses can lead to an increased risk of falls, a loss of autonomy, and even a deterioration of the quality of life. In this context, we know that dual task trainings are relevant and efficient. The use of games as support can enhance the motivation of participants. The objective of our work was to conceptualize, design, develop and evaluate the effectiveness in seniors of a personalized exergame based on the concept of cognitive-motor interference. We assessed the physical intensity of our exergame, then its short and medium term effectiveness for improving cognitive, motor and dual task capacities in seniors. We also evaluated the influence of our exergame on the level of physical activity, motivation, fear of falling and quality of life of the participants. Finally, we studied the level of security and adhesion of this game. We have thus shown that our exergame was usable as a training support, safe and appreciated by all its users (participants as well as facilitators). We have also shown that our moderately intense exergame improves cognitive functions and maintains motor functions in seniors. This project responds to the current challenges of better understanding the effectiveness of personalized exergames and opens up new perspectives on this topic.

Keywords: Dual task, active video game, cognitive training, motor training, elderly