



# La théorie de l'enrichissement cognitif à travers la stimulation physique : activité physique traditionnelle versus exergames

Pauline Maillot, Alexandra Perrot

## ► To cite this version:

Pauline Maillot, Alexandra Perrot. La théorie de l'enrichissement cognitif à travers la stimulation physique : activité physique traditionnelle versus exergames. NPG: Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie, 2012, 12 (71), pp.217-229. 10.1016/j.npg.2012.07.008 . hal-00737275

**HAL Id: hal-00737275**

**<https://hal.science/hal-00737275>**

Submitted on 3 Oct 2012

**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.

La théorie de l'enrichissement cognitif à travers la stimulation physique :  
Activité physique traditionnelle versus Exergames

P. Maillot & A. Perrot

P. Maillot, docteur en STAPS

A. Perrot, MCF en STAPS

CIAMS, EA 4532, UFR STAPS, Université Paris Sud, 91405 Orsay cedex

Conflit d'intérêt : aucun

Correspondance :

Pauline Maillot, UFR STAPS, Université Paris Sud, Bâtiment 335, 91405 Orsay cedex

Tel pro : 01 69 15 39 32 – Tel perso : 06 83 24 42 21

[pauline.maillot@u-psud.fr](mailto:pauline.maillot@u-psud.fr)

## Résumé

L'hypothèse de l'enrichissement cognitif suggère que l'ensemble des comportements et conduites adoptés par l'individu au cours de sa vie aurait un impact positif sur le niveau d'efficacité cognitive en avançant en âge. Cet article vise à argumenter en faveur de ce concept en présentant des travaux réalisés dans le domaine de la stimulation physique. En effet, plusieurs études interventionnistes ont fait état d'améliorations cognitives chez des personnes âgées suite à une sollicitation physique, et ce, soit à partir d'activités traditionnelles soit à partir d'une nouvelle catégorie de loisir, tel que les exergames qui associent une sollicitation physique avec une sollicitation cognitive issue des jeux vidéo.

## Abstract

The cognitive enrichment hypothesis suggests that, when getting on in years, all behaviors adopted in human's life course would have a positive impact of the level of cognitive efficacy. This article aims to argue in favor of this concept by putting forward the findings of studies in the physical stimulation domain. Indeed, several interventionist studies reported cognitive improvements following physical stimulation in the elderly. In that context, physical solicitation was referred to as either traditional activities or a rising category of recreational activity called exergames.

Traduction du titre : Cognitive Enrichment theory through physical stimulation view:  
traditional activities versus Exergames

Mots clés : Enrichissement cognitif - vieillissement - activité physique - exergames

Keywords: Cognitive enrichment - aging – physical activity - exergames

## La théorie de l'enrichissement cognitif à travers la stimulation physique : Activité physique traditionnelle versus Exergames

Le vieillissement demeure un phénomène très hétérogène, à la fois complexe et variable. Les individus héritent de prédispositions et adoptent des comportements variés, dont les différences s'amplifient avec les expériences de vie et les multiples interactions avec l'environnement [1]. Vis-à-vis de la cognition, de nombreux travaux tendent à démontrer que l'expression des effets de l'âge reste très différente, que ce soit d'un individu à l'autre (i.e., variabilité interindividuelle), ou d'une catégorie de fonctions cognitives à l'autre (i.e., variabilité intraindividuelle). La littérature sur la variabilité intraindividuelle souligne que l'ensemble des habiletés cognitives n'est pas touché de façon égale au cours du vieillissement. Plusieurs recherches s'accordent à dire que certaines habiletés mentales, comme l'intelligence fluide, déclinent davantage avec l'avancée en âge, en opposition à l'intelligence cristallisée qui a tendance à être préservée en vieillissant [2]. Par ailleurs, la littérature sur la variabilité interindividuelle a mis en évidence que l'évolution du fonctionnement cognitif ne suit pas toujours un pattern similaire selon les individus. En effet, certaines personnes conservent très longtemps un niveau élevé d'efficacité, tandis que d'autres présentent des modifications plus rapides [3]. De plus, lorsque les déclinis apparaissent, ils ne se manifestent pas toujours selon le même profil [3-4]. Ainsi, il est impossible d'ignorer que certaines personnes font preuve d'une vitalité cognitive très performante, malgré un âge avancé, sous-tendant l'existence de facteurs pouvant moduler les effets liés à l'âge. Cette observation amène à se poser la question de l'impact du style de vie et des expériences vécues sur le vieillissement des fonctions cérébrales.

### **De la plasticité cognitive à l'enrichissement cognitif**

L'étude du maintien de la vitalité cognitive au cours du vieillissement se situe à la rencontre de plusieurs concepts (i.e., vieillissement réussi, enrichissement cognitif, plasticité cognitive), et pose la question suivante : comment les capacités cognitives des personnes âgées peuvent-elles être préservées et/ou améliorées au cours du vieillissement normal via l'impact du style de vie ? Le vieillissement réussi, selon Rowe et Kahn [5], dépend de trois conditions interdépendantes, à savoir : i) une probabilité réduite de développer des maladies et les handicaps associés, (ii) un attrait à s'engager dans des activités sociales et/ou constructives et (iii) un maintien d'un haut niveau de fonctionnement cognitif et physiologique. Ce concept

associé à celui de compression des morbidités<sup>1</sup> met en lumière l'idée que le maintien du bien-être physique et psychologique chez la personne âgée permettrait de maximiser la durée d'un fonctionnement autonome efficace, et ainsi de minimiser celle où les individus sont fonctionnellement affaiblis en situation de dépendance. D'un point de vue sociétal, ce prolongement du seuil de fonctionnalité autonome est un objectif important afin de limiter les frais de santé. A l'échelle individuelle, le maintien d'un niveau de fonctionnement cognitif efficace apparaît simplement désirable dans le sens où il est associé à l'amélioration de la qualité de vie.

L'étude des différences dans le développement du vieillissement cognitif a été notamment impulsée par les travaux de Baltes et al. [6-7] qui identifient le principe selon lequel l'âge adulte est associé à un ensemble de gains et de pertes cognitives. Cependant, avec l'avancée en âge, les bénéfices deviennent moins importants au profit des pertes qui prédominent. Le fonctionnement cognitif possède une marge de développement, issue des influences biologique, comportementale et environnementale de chacun. Cette malléabilité correspond au concept de plasticité cognitive [8]. La plasticité est un processus adaptatif et dynamique, contraint par les limites biologiques et environnementales. De nombreux travaux empiriques ont mis en évidence cette capacité du cerveau à réorganiser les réseaux de neurones en fonction des stimuli et des expériences vécues, et ce, malgré un âge avancé [7-9]. L'observation de cette plasticité, telle une capacité d'adaptation et de modification, se situe à la fois au niveau des changements du comportement (i.e., plasticité comportementale) et du système nerveux central (i.e., plasticité cérébrale ou neuronale). Elle apparaît sous l'influence de différentes contraintes à la fois internes liées au développement, à la maturation, au vieillissement, et aux lésions, et externes via l'entraînement, l'enrichissement, et les substances pharmacologiques. Cette plasticité est donc en lien direct avec la notion d'enrichissement cognitif, de par une interdépendance de ces deux concepts. En effet, la trajectoire de vie d'un individu est étroitement liée à ses expériences et à ses choix, et ces choix et expériences ont des conséquences sur les fonctions cognitives et les structures qui les sous-tendent.

Le concept de l'enrichissement cognitif suggère que l'ensemble des comportements et conduites adoptés par l'individu au cours de son parcours de vie (e.g., activités cognitives, engagement social, exercice physique) aurait un impact positif sur le niveau d'efficacité cognitive en avançant en âge [1]. Il s'illustre principalement au travers de quatre profils

---

<sup>1</sup> La compression de la morbidité est une évolution démographique qui se caractérise par une survenue de plus en plus tardive des incapacités et de la dépendance chez les personnes âgées à mesure qu'augmente l'espérance de vie dans les sociétés occidentales.

développementaux du vieillissement cognitif. Le premier profil de développement reflète l'optimisation du fonctionnement cognitif par des performances cognitives maximales, situées à la frontière optimale du potentiel de développement de l'individu. Par analogie au monde sportif, cette trajectoire développementale correspondrait au régime comportemental suivi par un champion olympique visant les sommets de la performance. Le second type de profil correspond à une trajectoire de vie aux comportements mal adaptés, menant à une atrophie de la cognition associée à l'apparition de déclin de façon rapide et précipitée au cours de la vie. En opposition au profil précédent, il correspond à un style de vie non-optimal. Le troisième profil symbolise les déclin graduels, continus et bénins du fonctionnement cognitif au cours du vieillissement normal. Enfin, le dernier profil reflète l'effet d'un enrichissement cognitif, lorsqu'un individu s'engage dans des comportements enrichis qui sont d'une qualité et d'un degré non présents auparavant. Ce profil souligne que, même à un âge avancé, l'amélioration du fonctionnement cognitif est possible. L'impact significatif de variables modératrices environnementales sur le niveau de fonctionnement cognitif permettrait ainsi à terme d'influencer la trajectoire de développement.

Le concept de l'enrichissement cognitif transmet l'idée que les trajectoires liées au développement cognitif au cours de la vie ne sont pas nécessairement fixes et stables, mais peuvent être influencées et formées par des événements et des comportements. Le principal obstacle méthodologique concernant l'évaluation de l'hypothèse de l'enrichissement cognitif repose dans la difficulté à évaluer un phénomène se déroulant sur du long terme, c'est-à-dire appréhender au cours de la vie des modifications affectées par les expériences des individus. La méthode interventionniste apparaît à nos yeux et à travers la littérature comme la plus adéquate et pertinente à l'évaluation de cet enrichissement. Cependant, il nous semble également important de revenir sur les caractéristiques et principales limites des autres approches méthodologiques existantes.

### **Approche méthodologique de l'enrichissement cognitif**

La méthode transversale s'attache à comparer sur une même tâche les performances d'individus ou de groupes d'individus à un moment donné (i.e., différences d'âge, différents niveaux d'activité physique, intellectuelle, sociale). Cette méthode, relativement facile d'utilisation, autorise la mise en place de mesures fines et pertinentes. Cependant, elle présente quelques limites, des conclusions catégoriques ne pouvant être tirées aisément. En effet, les analyses transversales imposent, de par leur nature, une certaine prudence vis-à-vis de l'interprétation des résultats, en particulier dans les études sur le vieillissement, étant donné

qu'elles ne permettent pas d'évaluer les changements dus à l'avancée en âge, mais uniquement de mettre en évidence des différences entre les âges. Les sujets n'appartiennent pas à la même génération, ce qui ne garantit pas les mêmes expériences de vie. Aucun élément ne peut certifier que les sujets jeunes vieilliront de la même manière que les sujets âgés. Cet effet de cohorte représente une des limites essentielles de la méthode transversale. Ensuite, lorsque l'on cherche à étudier l'impact d'une activité particulière sur le vieillissement cognitif, il est impossible d'affirmer précisément que les tendances observées proviennent exclusivement de la pratique de celle-ci. De plus, il s'agit le plus souvent de mesures auto-rapportées, associées à un risque de désirabilité sociale. Enfin, cette méthode ne permet pas d'établir un lien de causalité, et donc de distinguer si ce sont des prédispositions génétiques physiques et/ou cognitives qui ont poussé certains individus à avoir un style de vie différent (i.e., exercer une activité physique régulière), ou si l'amélioration du fonctionnement cognitif général provient bien d'un style de vie davantage actif.

L'approche longitudinale consiste à suivre l'évolution des performances d'un même groupe d'individus durant une période prolongée. Elle permet ainsi d'étudier l'effet à l'exposition de certains facteurs de styles de vie, mais n'autorise toujours pas un lien de causalité. Les importantes difficultés inhérentes au protocole expérimental (i.e., longueur et lourdeur méthodologiques) ont fait que cette méthode demeure aujourd'hui considérablement sous-utilisée. De plus, cette démarche comporte deux inconvénients majeurs, (i) la mortalité expérimentale (i.e., réduction de la taille de l'échantillon initial suite à diverses sources d'abandon) et (ii) l'effet de familiarisation à la tâche (i.e., phénomène d'habituation au testing pouvant mener à des sous-estimations d'effets).

Face aux principales limites de ces deux dernières démarches, l'approche interventionniste offre un moyen de neutraliser le problème de causalité. En effet, elle consiste à étudier l'impact d'un programme d'entraînement (i.e., physique, cognitif ou social) sur les performances de participants souvent novices. Cette approche offre un plus grand contrôle pour évaluer les effets de l'enrichissement cognitif, de par l'assignation aléatoire des participants à des traitements spécifiques, et comparés à un ou plusieurs groupes contrôles. En confrontant les performances mesurées en prétest-posttest des différents groupes, cette approche offre trois dimensions d'évaluations : la magnitude (i.e., amplitude des améliorations), l'envergure (i.e., effet spécifique ou général), et la rétention (i.e., effet persistant ou rapidement dissipé). Par conséquent, les études interventionnistes apparaissent comme un puissant outil méthodologique pour explorer l'ampleur des effets de l'enrichissement sur la cognition humaine, et identifier les mécanismes sous-jacents à ces

effets en comparant les groupes expérimentaux appropriés. Cependant, aucune méthode expérimentale n'est exemptée de limites, plusieurs problèmes perdurent et sont à prendre en considération, même à travers une approche interventionniste. Tous les styles de vie se soumettent plus ou moins bien à cette approche expérimentale. Il est en effet délicat d'étudier, par exemple, l'impact des années d'éducation à travers une telle démarche. De plus, la pertinence de cette approche, dans le cadre de l'hypothèse de l'enrichissement cognitif, est parfois remise en question du fait de l'absence récurrente d'évaluation de la rétention des effets de l'entraînement, un ou deux ans après la fin de l'intervention [10]. Il convient également de faire attention à l'usage du lien de causalité, car la constitution des groupes requiert une procédure pleinement aléatoire, et la validation interne peut être menacée par le groupe contrôle qui pourrait spontanément se comporter comme s'il était dans l'intervention. Néanmoins, à l'heure actuelle, ce type d'étude propose le plus fort lien de causalité à propos des mécanismes de l'enrichissement et de son impact.

### **Facteurs responsables de l'enrichissement cognitif**

De nombreux travaux se sont intéressés à l'impact de certains facteurs en tant que modérateurs des effets de l'âge [11-12]. Ces études se sont particulièrement penchées sur l'effet des expériences et du style de vie sur le déclin cognitif, au travers du niveau d'éducation, des types d'activités de stimulations cognitives soutenues, ou encore du type de métier exercé. Un haut niveau de formation, un emploi de sollicitation complexe, et/ou la pratique d'une large variété de loisirs stimulants seraient fortement associés à un niveau cognitif performant, et à long terme, ils permettraient de favoriser un meilleur maintien de la vitalité cognitive [11]. Ainsi, les caractéristiques personnelles d'un individu à travers ces expériences et ces trajectoires de vie modulent fortement les déclins cognitifs en vieillissant. Cependant, une partie de ces travaux, notamment sur le niveau d'éducation et l'emploi exercé, présentée par Kramer, Bherer et al. [12], ne permet pas d'établir de relation de cause à effet entre les facteurs étudiés et le fonctionnement cognitif, notamment car les approches expérimentales utilisées ne peuvent être que transversales ou longitudinales. Pourtant, l'enjeu de l'enrichissement cognitif est d'identifier qu'il s'agit bien de l'activité de stimulation en elle-même qui est la cause du maintien des performances cognitives, et non l'inverse. L'intérêt actuel des recherches sur les modérateurs du vieillissement cognitif s'oriente davantage vers d'autres natures de facteurs explicatifs, notamment la stimulation physique. En effet, la lutte contre l'inactivité physique reste un combat de santé publique, particulièrement chez les seniors [1313]. Cet article de synthèse s'attache à présenter les principaux travaux qui

ont démontré que la stimulation physique permettait d'engendrer un enrichissement cognitif chez les personnes âgées. Seront alors abordés les articles référents dans le domaine de l'activité physique conventionnelle mais également les premières recherches ayant eu recours à l'activité physique assistée par jeux vidéo (i.e., les exergames).

### **Effets chroniques de l'exercice physique traditionnel sur la santé cognitive des seniors**

Les bienfaits de l'activité physique sur la santé sont aujourd'hui très largement reconnus. Depuis un demi-siècle, ils ont fait l'objet de nombreuses investigations. Ces recherches se sont intensifiées depuis une dizaine d'années en se focalisant davantage sur le vieillissement cognitif, allant jusqu'à se séparer en deux objets d'étude qu'il convient de clairement distinguer : les effets aigus versus les effets chroniques de l'activité physique. Les effets aigus désignent les effets immédiats (à court terme) d'une période unique d'activité physique de courte durée (i.e., de quelques secondes à quelques heures). Il s'agit de l'étude des effets transitoires de l'activité physique au travers de l'activité électrochimique des réseaux neuronaux [14]. Les effets chroniques, quant à eux, correspondent aux effets à long terme de la pratique physique (i.e., allant de quelques semaines à plusieurs années) modifiant de façon durable la plasticité cognitive. Dans cet article, seuls les effets chroniques de l'exercice physique sur la santé cognitive des seniors seront développés.

Au regard de la littérature abondante sur la relation entre l'activité physique et le vieillissement cognitif, il apparaît pertinent de synthétiser l'ensemble de ces travaux en deux sous-ensembles : d'abord les effets généraux au travers des différentes approches expérimentales, puis les effets spécifiques liés à la nature des activités proposées et aux fonctions cognitives ciblées. Tout d'abord, nous suggérons quelques points méthodologiques sur les outils de mesures à prendre en considération pour mettre en évidence un impact positif de l'activité physique sur la cognition.

#### *Considérations méthodologiques*

Les récentes avancées relatives aux effets bénéfiques de la pratique physique sur l'individu ont engendré un accroissement des travaux sur les outils de mesure et méthodes d'évaluation de l'activité physique [15]. Seules les deux méthodes d'évaluation les plus couramment utilisées par les études portant sur l'activité physique et le vieillissement cognitif

vont être développées dans cette partie. Il s'agit de méthodes de nature subjective puis objective qui peuvent être utilisées de façon complémentaire.

*Mesures subjectives* - Le questionnaire d'activité physique demeure la méthode subjective la plus employée pour évaluer et mesurer la quantité de pratique effectuée par un sujet sur une période donnée. Ils permettent une approche détaillée du style de vie en termes de nature des activités physiques pratiquées, d'intensité et de fréquence de pratique. Par exemple, le « Modifiable Activity Questionnaire » [16] mesure la quantité d'activité physique de l'année en cours, tandis que l'« Historical Leisure Activity Questionnaire » [16] permet d'obtenir une estimation de la quantité d'activité régulièrement pratiquée tout au long de la vie. Pour valoriser les taux de pratique obtenus par questionnaire, et étant donné que chaque activité physique ne présente pas les mêmes dépenses énergétiques, il est souvent pertinent de transformer ces valeurs en équivalent métabolique (MET, « Metabolic EquivalenT ») par l'intermédiaire notamment de la classification de Ainsworth et al. [17]. Cependant, les réponses aux questionnaires restent des mesures auto-rapportées et, par conséquent, dépendantes du comportement des participants qui est susceptible d'être influencé par la désirabilité sociale [18]. Même si cette estimation moyenne reste approximative et ne peut remplacer une mesure directe, elle permet d'obtenir des données complémentaires aux mesures objectives autorisant une connaissance plus fine du style de vie des participants.

*Mesures objectives* - La méthode la plus couramment employée pour évaluer l'activité physique, à travers l'aptitude physique aérobie, est la mesure de la consommation maximale d'oxygène. L'oxygène étant le carburant indispensable pour le fonctionnement de la voie métabolique aérobie [19], le  $\text{VO}_2 \text{ max}^2$  apparaît comme un des meilleurs indicateurs de la condition cardiorespiratoire chez l'homme. Cette condition fournit une information précise sur la relation entre l'activité physique et les fonctions cognitives, puisque la condition physique est largement déterminée par les habitudes de style de vie, et basée sur des mesures physiologiques objectives. Certains travaux concernant l'évolution de l'aptitude physique aérobie en fonction de l'âge ont mis en évidence une diminution de 10 % du  $\text{VO}_2 \text{ max}$  par décennie à partir de 25 ans [20]. Différents types d'ergomètres et de méthodologies de passation ont été développés pour évaluer l'aptitude physique aérobie, notamment chez la

---

<sup>2</sup> Le  $\text{VO}_2 \text{ max}$  (volume maximal d'oxygène absorbé) correspond à la quantité maximale d'oxygène qu'un individu est capable de consommer en une minute pendant qu'il effectue un exercice soutenu et avec effort. Il est mesuré en millilitre par kilogramme par minute ( $\text{mL} / \text{Kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

personne âgée. Ainsi, deux méthodes peuvent être distinguées : (i) les évaluations réalisées en laboratoire à l'aide d'ergocycles et de tapis de course qui peuvent être complexes et onéreuses, et (ii) les estimations de  $\text{VO}_2$  max par des tests de terrains, souvent davantage accessibles et très proches de l'évaluation de laboratoire. Parmi ces tests de terrain, deux ressortent de la littérature. D'une part, le Rockport One-Mile test [21] qui est un test sous-maximal visant à estimer le  $\text{VO}_2$  max chez des individus de 20 à 69 ans. Il consiste à parcourir en marchant la distance d'un mile (soit environ 1600 mètres) le plus rapidement possible. Les résultats obtenus sont corrélés à .90 avec le  $\text{VO}_2$  max, reflétant ainsi de façon fiable et valide la condition physique du participant. D'autre part, le test de marche de six minutes, TM6 [22] est également un test sous-maximal mais davantage à l'intention d'une population fragile et/ou âgée. Il consiste à parcourir la plus grande distance de marche sur une période de 6 minutes. Les résultats obtenus se présentent davantage comme une évaluation globale de la capacité fonctionnelle à l'exercice, c'est-à-dire une réponse globale et intégrée des systèmes pulmonaire, cardio-vasculaire, circulatoire ainsi que musculaire. La distance parcourue évaluée par le TM6 est corrélée de façon significative, mais non étroite, au  $\text{VO}_2$  max et à la classe fonctionnelle telle qu'évaluée par l'échelle à 4 points de la New York Heart Association [22], montrant ainsi sa validité comme mesure de la condition physique des seniors les moins actifs. Cependant, cette évolution ne se traduit pas nécessairement par une amélioration ciblée de l'aptitude physique aérobie, mais davantage par une meilleure disposition à la tolérance à l'effort physique, notamment en matière d'endurance cardiorespiratoire. La distance de marche évaluée par le test est souvent associée à une évaluation de la fréquence cardiaque et de la perception de l'effort fourni par l'échelle de Borg [23].

### *Approche générale*

La relation entre l'activité physique et la cognition a été empiriquement examinée à travers divers designs expérimentaux : l'approche longitudinale [24-25], l'approche transversale [26-27], et l'approche interventionniste [28-30] (Tableau 1). L'ensemble de ces travaux s'accorde en démontrant une relation positive entre la pratique régulière d'activité physique et le vieillissement cognitif. Les résultats de diverses méta-analyses renforcent ces conclusions en reportant d'importants effets standardisés (ES), suggérant ainsi de larges bénéfices de l'activité physique sur tout un ensemble de catégories de processus cognitifs chez des sujets âgés : ES = 0,48 [31] et ES = 0,10 à 1,17 [32]. L'impact positif de l'activité

physique a également été abordé au travers des neurosciences permettant de mettre en évidence les phénomènes et mécanismes responsables de ces améliorations [33-34]. En effet, les études animales suggèrent qu'un exercice prolongé aurait des modifications significatives à long terme sur la plasticité comportementale et cérébrale [35]. Au regard de l'ensemble de ces travaux, il apparaît assez clairement que la participation régulière à des programmes en activité physique engendre des bénéfices non négligeables au niveau des performances cognitives des seniors. Cependant, à l'inverse, certaines études n'observent pas de relation entre l'activité physique et les fonctions cognitives [36-37]. Effectivement, Madden et al. [36] n'observent aucun effet significatif sur des tests d'attention et de mémoire suite à un programme d'exercice aérobic de 16 semaines chez des personnes âgées de 60 à 83 ans. De même, Emery et Gatz [38] ne constatent aucun impact significatif au niveau de l'intelligence fluide suite à un entraînement aérobic de 12 semaines chez des seniors de 61 à 86 ans. Enfin, Perlmutter et Nyquist [37] ont observé, auprès de 127 participants âgés de 20 à 90 ans, la relation entre l'estimation de la santé physique et différentes mesures cognitives. Les résultats ne mettent en évidence aucun effet de l'activité physique sur des tests évaluant la mémoire, l'intelligence fluide et cristallisée. Même si le nombre de ces études plutôt contradictoires reste faible, il suggère que certaines caractéristiques méthodologiques (i.e., méthode d'évaluation de la condition physique et de la cognition) sont à prendre en considération pour mettre en évidence un impact positif de l'activité physique sur la cognition.

### *Approches spécifiques*

Comme nous venons de le voir, même si la littérature semble mettre en évidence un lien positif général entre l'activité physique et la cognition, il demeure pertinent de s'intéresser aux effets spécifiques de l'activité physique, selon la nature d'activités physiques et les fonctions cognitives ciblées par la pratique.

Récemment, certains travaux ont mis en évidence que l'amélioration de la santé cardiorespiratoire, suite à un programme d'intervention composé d'exercices aérobies<sup>3</sup> sur plusieurs mois, permettait l'amélioration de performances cognitives [28-30], et ce, plus particulièrement sur les processus dits exécutifs [29]. En effet, Rikli et Edwards [30] ont entraîné pendant 3 ans des femmes de 57 à 83 ans à la marche rapide et à la danse aérobic. Ils ont comparé les performances des participantes entraînées avec celles du groupe contrôle qui

---

<sup>3</sup> L'activité physique aérobic réfère à tous les exercices qui sollicitent la filière énergétique dite aérobic. Cette filière se traduit par la capacité de l'organisme à extraire, transporter et utiliser l'oxygène pour transformer l'énergie. L'activité physique dite aérobic stimule la fonction cardiorespiratoire et ce à partir d'un certain niveau d'intensité d'exercice. Il s'agit généralement d'activité d'endurance telle que la course ou la marche rapide.

ne participaient à aucun entraînement. Les résultats mettent en évidence que les scores cognitifs des participantes entraînées se sont améliorés. Les auteurs suggèrent que les améliorations observées sur les tests de vitesse de traitement seraient liées à l'amélioration de la condition physique, qui cependant, ici, n'était pas évaluée. Par la suite, les travaux de Kramer et al. [29] ont mis en évidence que l'effet de l'activité physique aérobie était davantage marqué sur les fonctions exécutives. Les fonctions exécutives réfèrent à une variété d'activités cognitives telles que l'adaptation à la nouveauté, la planification et la mise en œuvre de stratégies nouvelles, le contrôle et la régulation de l'action, la capacité à tenir compte de l'information en retour pour ajuster et adapter la réponse, et la capacité d'inhibition des informations non pertinentes à la tâche [39]. Elles correspondent donc aux processus cognitifs qui contrôlent, régulent, et intègrent les autres activités cognitives. Ainsi, Kramer et al. ont comparé les performances sur plusieurs tâches cognitives (i.e., vitesse de traitement de l'information, fonctions exécutives, mémoire de travail, mémoire verbale, attention spatiale) suite à un programme d'entraînement de 6 mois soit en condition aérobie (i.e., marche), soit non-aérobie (i.e., étirements). Cette étude souligne que les sujets assignés au groupe aérobie améliorent leurs performances à plusieurs de ces tâches cognitives, et notamment au niveau des composantes exécutives (i.e., tâche de comptabilité de réponse, tâche de transfert attentionnel et tâche d'inhibition). Enfin, les travaux de Dustman et al. [28] proposent une comparaison entre deux types de programmes d'entraînement, aérobie versus force/souplesse, et un groupe contrôle. Les auteurs ont démontré que seul le groupe aérobie avait nettement amélioré son  $VO_2$  max, et que cette amélioration de la santé cardiorespiratoire était directement liée à des améliorations cognitives significatives. Ainsi, l'interprétation physiologique, appelée hypothèse métabolique ou circulatoire, stipule que l'amélioration significative de l'aptitude physique aérobie, mesurée par  $VO_2$  max, engendrerait une augmentation du flux sanguin cérébral et permettrait ainsi une meilleure oxygénation du système nerveux central [40]. Cette hypothèse s'appuie sur la mise en évidence d'une corrélation entre les performances cognitives et la capacité aérobie des sujets [28-29]. Ainsi, l'exercice chronique maintiendrait l'intégrité cérébrovasculaire en réduisant les risques d'hypoxie du cerveau, ce qui pourrait améliorer le métabolisme glucidique et celui des neurotransmetteurs essentiels au bon fonctionnement cognitif [41]. L'amélioration de la santé cardiorespiratoire serait donc un potentiel médiateur physiologique responsable de l'amélioration des performances cognitives. Cette hypothèse est à mettre directement en lien avec celle du contrôle exécutif. En effet, de nombreux travaux ont démontré que le contrôle exécutif était fortement sensible à l'avancée en âge [42]. Ces habiletés sont supportées en

large partie par les régions frontales et préfrontales du cerveau. Ces régions sont particulièrement vulnérables au déficit de flux sanguin avec l'avancée en âge [43-44]. Parallèlement, de nombreux auteurs s'accordent pour dire que l'effet de l'activité physique ou de l'aptitude physique aérobie serait particulièrement important voire spécifique aux fonctions cognitives dépendantes des aires frontales, par une amélioration du flux sanguin dans ces régions cérébrales [29, 31, 33]. Ces études confortent l'hypothèse métabolique, qui est actuellement la plus soutenue dans la littérature. Cependant, certains travaux ne sont pas parvenus à mettre en évidence une supériorité des performances cognitives chez des participants entraînés de façon aérobie vis-à-vis de participants entraînés par des exercices de force et de souplesse [45]. De plus, la récente méta-analyse d'Etnier et al. [46] ne met en évidence aucun lien de proportionnalité entre le degré d'amélioration des fonctions cognitives et les performances physiques. L'explication résiderait partiellement dans le fait que la mesure des performances physiques utilisée dans le corpus d'études n'était généralement pas spécifique aux modifications qui surviennent au sein du système nerveux central. Ainsi, même si le niveau d'aptitude physique aérobie semble être un facteur important dans la relation entre activité physique et fonctionnement cognitif, il n'est probablement pas le seul mécanisme à pouvoir rendre compte des bienfaits de l'activité physique sur le vieillissement cognitif [31, 46].

Dans ce sens, la méta-analyse de Colcombe et Kramer [31] a mis en évidence que des participants âgés engagés dans un entraînement combinant les capacités aérobies, la force et la souplesse, amélioreraient davantage leurs performances lors de tests mesurant la cognition que des participants engagés uniquement dans un entraînement de type aérobie. Ces précédents travaux sous-tendent donc l'existence d'autres mécanismes neurophysiologiques et psychologiques que l'hypothèse métabolique (préalablement décrite), sous-jacents à l'amélioration des performances cognitives. Il faut également s'orienter vers les études animales pour considérer d'autres mécanismes responsables des bienfaits de l'activité physique [35]. Au sein de ce champ spécifique, et dans le cadre du concept de l'enrichissement cognitif, l'hypothèse de l'augmentation de la plasticité synaptique retient également notre attention. Elle stipule que sous l'effet de nouvelles expériences sensorielles et motrices, permises notamment par l'activité physique de toute nature, le réseau de connectivité cérébral se modifierait en créant de nouvelles connexions (i.e., synaptogenèse) ou en renforçant l'efficacité de la transmission synaptique de certaines connexions. Cette hypothèse participe donc activement au cadre explicatif des effets modérateurs de l'activité

physique sur les performances cognitives, en particulier lorsque les pratiques sont de nature combinée ou non aérobie. (insérer tableau 1)

### **Barrières à l'engagement dans un style de vie actif**

Au regard de ces travaux, le lien semble donc établi entre l'activité physique et le vieillissement cognitif. Pour autant, les seniors ne semblent pas toujours suffisamment sensibles à l'adoption d'un style de vie actif. En effet, malgré les fréquentes recommandations internationales en faveur de la santé et de la pratique de l'activité physique [47], il est démontré que le vieillissement est associé à une augmentation de l'adoption de comportements sédentaires [48]. Au travers de plusieurs études prospectives et de revue de littérature [48-49], les seniors reportent une variété de barrières quant à leur engagement dans la pratique régulière d'une activité physique, telles que le manque de temps et de connaissance de la relation activité modérée et santé, la perception de limites corporelles et fonctionnelles, le manque d'énergie, mais aussi un défaut d'accessibilité et d'attractivité des pratiques. Le plaisir est un déterminant important qui influence le temps qu'un individu peut allouer à une activité [50]. Ainsi, les activités répétitives, telles que la marche, peuvent mener à l'ennui et à la lassitude, ce qui ne favorise donc pas le plaisir associé, ni l'adhérence à une activité. Par conséquent, au regard des difficultés à modifier les habitudes de vie, l'enjeu actuel des chercheurs et prescripteurs est de parvenir à favoriser l'engagement des seniors vers un style de vie actif en contournant les barrières observées. Les exergames, combinaison de l'entraînement physique et de la sollicitation cognitive par jeux vidéo, pourraient remplir ce rôle d'amorce vers une activité physique régulière. En effet, cette nouvelle pratique en pleine essor fait l'objet d'un réel engouement auprès des seniors. Il apparaît alors pertinent de penser que cette activité possède un véritable potentiel en termes de plaisir véhiculé, d'accessibilité et d'attractivité, et pourrait, par conséquent, favoriser la participation à des activités d'intensité modérée, fortement recommandées dans la lutte contre le vieillissement cognitif.

Beaucoup de discours publics sur les jeux vidéo renvoient aux préoccupations associées à l'effet négatif que peuvent avoir ces pratiques sur la vie des joueurs, notamment des plus jeunes (i.e., addiction, agressivité, inactivité physique et sociale). Cependant, la littérature semble mettre en évidence de façon croissante les potentialités des jeux vidéo comme modérateurs des effets de l'âge sur les performances cognitives. Le statut des jeux vidéo a évolué et s'est transformé au sein de la société. En effet, le champ d'application ne se restreint plus au seul divertissement, mais davantage à des finalités dites « sérieuses »,

notamment dans les domaines de la santé et de l'éducation. Ce nouvel engouement à vocation davantage utilitaire est désigné par le terme « Serious Game ». Par cette appellation, il est possible de dissocier plusieurs catégories d'application, dont les nouvelles consoles de jeux vidéo qui proposent d'associer la sollicitation cognitive des jeux vidéo classiques à de nouvelles interfaces tenant compte des dimensions physique et motrice. Dans la littérature, cette nouvelle pratique fait l'objet de nombreuses tentatives de définitions au travers de l'utilisation de plusieurs termes : exergames, jeux vidéo actifs, jeux vidéo interactifs, ou jeux vidéo d'entraînement, en opposition aux jeux vidéo traditionnels, qualifiés de jeux sédentaires, dit inactifs ou passifs. Le terme « exergames » ou « exergaming » est actuellement le plus repris dans la littérature. Ce néologisme composé des mots « exercise » et « game » désigne la combinaison de l'exercice physique et des jeux vidéo. Cette pratique se traduit par l'utilisation de différentes interfaces, toutes permettant une activation physique et motrice : ergocycle, tapis de danse, plateforme de force et de pressions, capteurs de mouvement, caméra [51].

#### *Effet des exergames sur le vieillissement cognitif*

A l'heure actuelle, seuls quatre études se sont penchées sur l'impact des exergames sur le fonctionnement cognitif des seniors (Tableau 2). D'un point de vue des effets aigus de cette pratique, O'Leary et al. [52] ont étudié si une courte et intense période d'entraînement avec des exercices aérobies (i.e., « acute ») par exergames engendrait les mêmes effets sur les performances cognitives que ceux démontrés par l'exercice aérobique conventionnel au travers de nombreuses études [14]. Ils ont alors observé les effets d'une période isolée de 20 minutes de pratique sur une tâche d'inhibition, en comparant un programme d'exercices d'aérobie en exergames avec un programme en jeux vidéo sédentaires et un programme aérobique traditionnel. Les résultats soulignent que la pratique de 20 minutes d'exergames engendre des bénéfices physiques mais aucune amélioration cognitive. Il est probable que cette absence de résultat soit due à une activation physique trop brève et pas assez intense. En effet, plusieurs travaux ont montré que les performances cognitives (i.e., tâche d'inhibition) étaient facilitées suite à une activation physique par exercice aérobique modéré de 20 à 40 minutes [14].

D'un point de vue des effets chroniques de la pratique des exergames, en 2010, Rosenberg et al. [53] ont constaté que trois fois 35 minutes par semaine d'entraînement en exergames Wii sports pendant 3 mois engendraient chez des sujets âgés dépressifs un effet significativement positif sur la dépression et l'anxiété, la qualité de vie liée à la santé mentale et le fonctionnement cognitif. Cette étude suggère également une forte attractivité et une

importante accessibilité des exergames pour un public novice et âgé. Cependant, quelques limites inhérentes au protocole mis en place atténuent la portée de ces résultats encourageants. Tout d'abord, les conclusions sur les améliorations du fonctionnement cognitif sont issues d'une batterie globale, sollicitée davantage dans le cadre de diagnostic clinique (RBANS), ne permettant pas d'obtenir une évaluation fine et précise des fonctions cognitives. Ensuite, aucun groupe contrôle ne permet de rejeter la possibilité que les bénéfices constatés soient issus d'un effet test-retest. Enfin, il est impossible de dire si la pratique des exergames relève bien du domaine de l'activité physique puisqu'aucune mesure de dépense énergétique ni d'intensité d'effort n'a été effectuée chez les participants qui ont suivi le programme. Face à ces principales limites, en 2012, Maillot, Perrot et Hartley [54] ont testé l'impact de 24 heures de pratique des exergames (principalement Wii sport et Wii fit), à raison de deux fois une heure par semaine, pendant 3 mois, sur les fonctions physiques (souplesse, force musculaire, vitesse de marche, endurance) et cognitives (i.e., exécutives, visuospatiales et vitesse de processus) de sujets âgés sains. Un groupe contrôle, ne suivant aucun programme d'intervention, a été intégré au protocole, et n'a révélé aucune amélioration. Les résultats pour le groupe entraîné annoncent des bénéfices à la fois physiques et cognitifs. Les fonctions exécutives et la vitesse de processus se sont significativement améliorées suite à la pratique de 24 heures d'exergames. Seules les fonctions visuospatiales ne se sont pas montrées sensibles au programme mis en place. Ces résultats annoncent que les exergames engendreraient des bénéfices cognitifs équivalents voire supérieurs à ceux observés par la pratique d'une activité physique plus conventionnelle [28, 55]. Les auteurs émettent l'hypothèse que les améliorations observées seraient, d'une part, associées à l'amélioration de la santé cardiorespiratoire en accord avec l'hypothèse dite métabolique propre à l'activité physique, et d'autre part, liées à l'hypothèse dite de la richesse environnementale engendrée par les exergames. Cette hypothèse suggère que les caractéristiques intrinsèques des jeux vidéo pourraient expliquer pourquoi les améliorations observées semblent plus importantes que celle associées à une pratique physique plus classique. Les auteurs distinguent quatre caractéristiques potentiellement explicatives des bénéfices observés. Tout d'abord, les programmes d'entraînement par jeux vidéo, d'ordre cognitif ou physique, sont perçus comme très attractifs et motivants, favorisant ainsi l'apprentissage et le transfert [56]. Ensuite, le fait de pouvoir manipuler le niveau de difficulté au sein même des jeux semble favoriser l'adaptation des joueurs à la tâche, et encourager de meilleures performances, notamment en faveur d'un public novice tel que les seniors [57]. De plus, l'attractivité naturelle et la motivation induite par les feedbacks proposés lors des jeux seraient des déterminants au

développement et à l'apprentissage de nouvelles habiletés [58]. Enfin, le dernier déterminant important associé aux effets des exergames serait la variabilité apportée par les propriétés intrinsèques de la stimulation cognitive par jeux vidéo. En effet, certains auteurs affirment que les apprentissages sont engendrés par l'intermédiaire d'une importante diversité dans les tâches d'apprentissage et dans les types d'interaction proposés [59]. Cette hypothèse suggère que plus un programme d'entraînement est associé à une variété de combinaisons de processus impliqués, plus l'effet de transfert observé serait important [60].

La dernière étude en date sur l'impact des exergames a été menée en 2012 par Anderson-Hanley et al. [61]. Ils ont étudié l'effet de trois mois d'entraînement en cybercycle (i.e., exergames) en comparaison à un cycle traditionnel sur le fonctionnement exécutif, l'attention, la fluidité verbale, les capacités visuospatiales et mnésiques, et la dextérité de personnes âgées saines. La sollicitation physique lors des deux entraînements était identique en termes de fréquence, de durée, de dépense calorique, de distance parcourue, de vitesse de pédalage et d'intensité développée. En accord avec les conclusions de Maillot et al. [54], les résultats annoncent une amélioration spécifique des fonctions exécutives uniquement en faveur du groupe en cybercycle. Les auteurs émettent l'hypothèse que les bénéfices observés seraient directement associés à l'expérience en réalité virtuelle qui requiert tout au long de l'entraînement, en plus de l'effort physique, un focus additionnel au niveau de l'attention divisée et de la prise de décision. Ces habiletés dépendent des fonctions exécutives, lesquelles sont significativement affectées en vieillissant [43].

En conclusion, même si le nombre d'études empiriques reste aujourd'hui encore très faible, de par un probable manque de recul sur cette nouvelle activité, les premières tendances mettent en évidence le caractère prometteur des exergames dans le maintien de la vitalité physique et cognitive, notamment à travers les travaux de Maillot et al. [54] et Anderson-Hanley et al. [61]. Les quatre études s'accordent également sur le potentiel des exergames en termes d'accessibilité et d'attractivité intrinsèque pour les seniors, apparaissant ainsi comme une éventuelle alternative aux barrières liées à l'engagement dans la pratique physique.  
(insérer Tableau 2)

Pour résumer, cet article avait pour ambition de mettre en lumière la théorie de l'enrichissement cognitif à travers une présentation des principaux travaux dans le domaine de la stimulation physique. L'originalité était d'exposer parallèlement les études dans le domaine de l'activité physique traditionnelle avec celles du domaine des jeux vidéo actifs. En dehors de la capacité des exergames à réduire chez les seniors les barrières à l'engagement dans un

style de vie actif, nous pensons que cette nouvelle catégorie de pratique présente un véritable intérêt pour le maintien de l'autonomie fonctionnelle. Les travaux de recherche dans le domaine de l'environnement virtuel appliqué aux seniors est encore à son balbutiement, mais il est plausible d'envisager qu'avec de meilleures connaissances des répercussions de cet outil sur les activités fonctionnelles, alors les interventions pourraient être plus adaptées. Si la recherche en réalité virtuelle développe de nombreux outils destinés à la rééducation de populations pathologiques, l'évolution des finalités des jeux vidéo autorise à accorder une importance particulière à ce système attrayant et peu coûteux. Les efforts actuels de simplification de l'utilisation de ces outils numériques, d'amélioration de leur ergonomie (pour pallier aux déficiences visuelles, sensorimotrices et cognitives) et d'identification des besoins des plus âgés doivent être poursuivis. Un tel objectif implique d'approfondir les collaborations entre les développeurs des outils numériques et d'autres professionnels : ergothérapeutes, neuropsychologues, psychomotriciens, orthophonistes, et gériatres.

## Références

1. Hertzog C, Kramer AF, Wilson, RS et al. *Enrichment effects on adult cognitive development: Can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced?* *PSPI* 2009; 9: 1-65.
2. Fontaine R. *Psychologie du vieillissement*. Paris: Dunod, 2007.
3. Ylikoski R, Ylikoski A, Keskivaara P, et al. *Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risk for cognitive decline*. *Eur J Neurol* 1999; 6: 645-52.
4. Valdois S, Joannette Y, Poissant, A, et al. *Heterogeneity in the cognitive profile of normal elderly*. *J Clin Exp Neuropsychol* 1990; 12: 587-96.
5. Rowe JW, Kahn R. *Successful aging*. New York: Pantheon Books, 1998.
6. Baltes PB, Lindenberger U, Staudinger UM. *Lifespan theory in developmental psychology*. In: Damon W, Lerner RM, eds. *Handbook of child psychology*. New York: Wiley, 2006: 569-664.
7. Baltes PB, Willis, SL. *Plasticity and enhancement of intellectual functioning in old age: Penn State's Adult Development and Enrichment Project (ADEPT)*. In: Craik FIM, Trehub SE, eds. *Aging and cognitive processes*. New York: Plenum Press, 1982: 353-389.
8. Greenwood, PM, Parasuraman R. *Neuronal and cognitive plasticity: a neurocognitive framework for ameliorating cognitive aging*. *Front Aging Neurosci* 2010 Nov 29; 2:150.
9. Schaie KW, Willis SL. *Can intellectual decline be reversed?* *Dev Psychol* 1986; 22: 223-32.
10. Salthouse TA. *Mental exercise and mental aging: Evaluating the validity of the "use it or lose it" hypothesis*. *Perspect Psychol Sci* 2006; 1: 68-87.
11. Hultsch DF, Hertzog C, Small BJ, et al. *Use it or lose it: engaged lifestyle as a buffer of cognitive decline in aging?* *Psychol Aging* 1999; 14: 245-63.
12. Kramer AF, Bherer L, Colcombe SJ, et al. *Environmental influences on cognitive and brain plasticity during aging*. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2004; 59: 940-57.
13. Paterson DH, Jones GR, Rice CL. *Ageing and physical activity: evidence to develop exercise recommendations for older adults*. *CJPH* 2007; 98: 69-108.
14. Dietrich A, Audiffren M. *The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise*. *Neurosci Biobehav Rev* 2011; 35: 1305-25.

15. Dishman RK. *Measurement of physical activity*. In Poon L, Chodzko-Zajko W, Tomporowski PD, eds. *Active living, cognitive functioning, and aging*. Champaign: Human Kinetics. 2006: 91-113
16. Kriska AM, Knowler WC, LaPorte RE, Drash AL, Wing RR, Blair SN,... Kuller LH. *Development of questionnaire to examine relationship of physical activity and diabetes in Pima Indians*. *Diabetes Care* 1990; 13: 401-11.
17. Ainsworth, BE, Haskell WL, Leon AS, Jacobs DR, Montoye HJ, Sallis JF, Paffenbarger RS. *Compendium of physical activity: Classification of energy costs of human physical activities*. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25: 71-80.
18. Lemaire P, Bherer L (2005). *Psychologie du vieillissement. Une approche cognitive*. Bruxelles : De Boeck Université. 2005.
19. Préfaut C, Fabre C, Masse-Biron J. *Aptitude physique aérobie et vieillissement. Effets de l'entraînement*. In Périé H, Jeandel C, eds. *Réussir son avancée en âge. Évaluation des activités physiques en gérontologie*. Paris : Frison-Roche. 1998 : 27-39.
20. Hawkins S, Wiswell R. *Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: implications for exercise training*. *Sports Med* 2003; 33: 877-88.
21. Kline GM, Porcari JP, Hintermeister R, Freedson PS, Ward A, McCarron RF.,... Rippe JM. *Estimation of VO<sub>2</sub>max from a one-mile track walk, gender, age, and body weight*. *Med Sci Sports Exerc* 1987; 19: 253-59.
22. Lipkin DP, Scriven AJ, Crake T, Poole-Wilson PA. *Six minute walking test for assessing exercise capacity in chronic heart failure*. *BMJ* 1986; 292: 653-5.
23. Borg GA. *Psychophysical bases of perceived exertion*. *Medicine and science in sports and exercise* 1982; 14: 377-81.
24. Barnes DE, Yaffe K, Satariano WA, et al. *A longitudinal study of cardiorespiratory fitness and cognitive function in healthy older adults*. *J Am Geriatr Soc* 2003; 51: 459-65.
25. Yaffe K, Barnes D, Nevitt M, et al. *A prospective study of physical activity and cognitive decline in elderly women: women who walk*. *Arch Intern Med* 2001; 161: 1703-8.
26. Clarkson-Smith L, Hartley AA. *Relationships between physical exercise and cognitive abilities in older adults*. *Psychol Aging* 1989; 4: 183-9.
27. Hillman CH, Motl RW, Pontifex MB, et al. *Physical activity and cognitive function in a cross-section of younger and older community-dwelling individuals*. *Health Psychol* 2006; 25: 678-87.
28. Dustman RE, Ruhling RO, Russell EM, et al. *Aerobic exercise training and improved neurophysiological function of older adults*. *Neurobiol Aging* 1984; 5: 35-42.

29. Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, et al. Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature* 1999; 400: 418-9.
30. Rikli RE, Edwards DJ. Effects of a 3-year exercise program on motor function and cognitive processing speed in older women. *Res Q Exerc Sport* 1991; 62: 61-7.
31. Colcombe SJ, Kramer AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychol Sci* 2003; 14: 125-30.
32. Angevaren M, Aufdemkampe G, Verhaar HJ, et al. Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database Syst Rev* 2008 Jul 16; (3): CD005381.
33. Colcombe SJ, Kramer AF, McAuley E, et al. Neurocognitive aging and cardiovascular fitness: recent findings and future directions. *J Mol Neurosci* 2004; 24: 9-14.
34. Erickson KI, Kramer AF. Aerobic exercise effects on cognitive and neural plasticity in older adults. *Br J Sports Med* 2009; 43: 22-4.
35. Audiffren M, André N, Albinet C. Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors: bilan et perspectives. *Rev Neuropsychol* 2011 ; 3: 207-25.
36. Madden DJ, Blumenthal JA, Allen PA, et al. Improving aerobic capacity in healthy older adults does not necessarily lead to improved cognitive performance. *Psychol Aging* 1989; 4: 307-20.
37. Perlmutter M, Nyquist L. Relationships between self-reported physical and mental health and intelligence performance across adulthood. *J Gerontol* 1990; 45: 145-55.
38. Emery CF, Gatz M. Psychological and cognitive effects of an exercise program for community-residing older adults. *Gerontologist* 1990; 30: 184-8.
39. Rabbitt P. Introduction: Methodologies and models in the study of executive function. In P. Rabbitt, ed. *Methodology of frontal and executive function*. Hove: Psychology Press, 1997: 1-38.
40. Dustman RE, Emmerson RY, Shearer DE. Physical activity, age, and cognitive-neurophysiological function. *J Aging Phys Act* 1994; 2: 143-81.
41. Colcombe SJ, Kramer AF, Erickson KI, Scalf P, McAuley E, Cohen NJ, Webb A, Jerome GJ, Marquez DX, Elavsky S. Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)* 2004; 101(9): 3316-21.
42. Marquié JC, Isingrini M. Aspects cognitifs du vieillissement normal. In: Albaret JM, Aubert E, eds. *Vieillesse et psychomotricité*. Marseille: Solal, 2001: 77-113.

43. Raz N. Aging of the brain and its impact on cognitive performance: integration of structural and functional findings. In Craik FIM, Salthouse TA, eds. *The handbook of aging and cognition*. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2000: 1-90.
44. West R. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychol Bull* 1996; 120: 272-92.
45. Smiley-Oyen AL, Lowry KA, Francois SJ. Exercise, fitness, and neurocognitive function in older adults: The “selective improvement” and “cardiovascular fitness” hypotheses. *Ann Behav Med* 2008; 36: 280-91.
46. Etner JL, Nowell P, Landers DM, et al. A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Res Rev* 2006; 52: 119-30.
47. Chodzko-Zajko W, Schwingel A, Park CH. Successful Aging: The Role of Physical Activity. *AJLM Medicine* 2009; 3: 20-8.
48. Slingerland AS, van Lenthe FJ, Jukema JW, et al. Aging, retirement, and changes in physical activity: prospective cohort findings from the GLOBE study. *Am J Epidemiol* 2007; 165: 1356-63.
49. Schutzer KA, Graves BS. Barriers and motivations to exercise in older adults. *Prev Med* 2004; 39: 1056-61.
50. Dishman RK, Motl RW, Saunders R, et al. Enjoyment mediates effects of a school-based physical-activity intervention. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37: 478-87.
51. Sinclair J, Hingston P, Masek M. Considerations for the design of exergames. In: *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*. New York: ACM, 2007.
52. O'Leary KC, Pontifex MB, Scudder MR, et al. The effects of single bouts of aerobic exercise, exergaming, and videogame play on cognitive control. *Clin Neurophysiol* 2011; 122: 1518-25.
53. Rosenberg D, Depp CA, Vahia IV, et al. Exergames for subsyndromal depression in older adults: A pilot study of a novel intervention. *Am J Geriatr Psychiatry* 2010; 18: 221-6.
54. Maillot P, Perrot A, Hartley A. Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. *Psycholo Aging* 2011 Nov 28. [Epub ahead of print]
55. Dustman RE, Emmerson RY, Steinhaus LA, et al. The effects of videogame playing on neuropsychological performance of elderly individuals. *J Gerontol* 1992; 47: 168-71.
56. Graves LE, Ridgers ND, Williams K, et al. The physiological cost and enjoyment of Wii Fit in adolescents, young adults, and older adults. *J Phys Act Health* 2010; 7: 393-401.

57. Ahissar M, Hochstein S. *The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning.* *Trends Cogn Sci* 2004; 8: 457-64.
58. Herzog MH, Fahle M. *The role of feedback in learning a vernier discrimination task.* *Vision Res* 1997; 37: 2133-41.
59. Schmidt RA, Bjork RA. *New conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training.* *Psychol Sci* 1992; 3: 207-17.
60. Green CS, Bavelier D. *Exercising your brain: a review of human brain plasticity and training-induced learning.* *Psychol Aging* 2008; 23: 692-701.
61. Anderson-Hanley C, Arclero PJ, Brickman AM, et al. *Exergaming and older adult cognition. A cluster randomized clinical trial.* *Am J Prev Med* 2012; 42: 109-19.